

**Національний технічний університет України  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені Ігоря Сікорського»**

**МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ**

**Кафедра технології машинобудування**

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Юрій ПЕТРАКОВ**

(підпис)

(власне ім'я, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Технології машинобудування»**

**зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»**

на тему: Стабілізація умов контурного фрезерування на верстаті з ЧПК

Виконав:

студент 6 курсу, групи МТ-91мн

\_\_\_\_\_ Мигович Артур Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Лашина Ю.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2021 року

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Стабілізація умов контурного фрезерування на верстаті з ЧПК» складається з 84 аркушів формату А4 та містить 30 ілюстрацію, 17 таблиць, 1 додаток. При написанні роботи було використано 31 літературних джерел серед яких методичні вказівки, посібники, довідники, каталоги, наукові роботи, статті.

**Актуальність теми.** Наразі процес контурного фрезерування відбувається на верстаті з ЧПК, що оброблює за управляючою програмою, яка створюється в САМ-системах (Computer Aided Manufacturing). Не зважаючи на безсумнівний прогрес в програмуванні управляючих програм, вони мають деякі вади, пов'язані з відсутністю в апіорній інформації, головної характеристики процесу різання – швидкості видалення припуску (MRR – Material Removal Rate). Таким чином стабілізація управління за MRR дозволить виправити ці вади.

**Мета роботи.** Розроблення методу стабілізації процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК.

### **Завдання дослідження:**

1. Спроекувати в САМ-системі управляючу програму записану в G-кодах.
2. Розробити прикладну програму для створення масивів точок траєкторій руху інструменту.
3. Сформувати масиви траєкторій руху інструменту.
4. Моделювати процес оброблення
5. Створити управляючу програму, що враховуючи MRR стабілізує процес контурного фрезерування.

**Об'єкт дослідження:** процес контурного фрезерування.

**Предмет дослідження:** стабілізація умов контурного фрезерування на верстаті з ЧПК.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Результати наукового дослідження можуть бути використані у стабілізації умов контурного фрезерування на верстатах з ЧПК та подальшій оптимізації процесу оброблення. В ході виконання дисертації був створений цифровий масив точок траєкторії руху інструменту та проведена стабілізація умов контурного фрезерування по попередньо створеній САМ-системою управляючій програмі.

**Апробація результатів дисертації та публікації.** Під час роботи над магістерською дисертацією було видано дві тези доповіді та дві статті на конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні» і одна стаття у виданні «Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"»:

Мигович А. В., Петраков Ю. В. Стабілізація режиму різання САМ-системами [Електронний ресурс] / Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», 2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету України. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2020/paper/view/21431>

Мигович А. В., Петраков Ю. В. Технологія програмування фрезерування контурів для верстатів з ЧПК [Електронний ресурс] / Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», 2021 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету України. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2021/paper/view/23550>

Мигович А. В., Петраков Ю. В. Технології iMachining для верстатів з ЧПК. Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», 2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету України». – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://ampr.diit.edu.ua/index.php/wissn087/article/view/201962>

Петраков Ю.В., Мигович А.В. Аналіз технологій iMachining для контурного фрезерування// Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування. 2020. Т.89, №2. С.114-120. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202065>.

**Ключові слова.** УПРАВЛІННЯ РІЗАННЯМ,СТАБІЛІЗАЦІЯ, MRR, КОНТУРНЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК, ЦИФРОВІ МАСИВИ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ІНСТРУМЕНТУ.

# ABSTRACT

The master's thesis on " Stabilization of contour milling conditions on a CNC machine" consists of 84 sheets of A4 format and contains 30 illustrations, 17 tables, 1 appendix. When writing the work, 31 literature sources were used, including guidelines, manuals, directories, scientific papers, articles.

**Actuality of theme.** Currently, the process of contour milling takes place on a CNC machine, which is processed according to the control program that is created in CAM (Computer Aided Manufacturing) systems. Despite the undoubted progress in programming control programs, they have some shortcomings associated with the lack of a priori information, the main characteristic of the cutting process – the speed of removing the allowance (MRR – Material removal Rate). Thus, stabilizing by MRR control will correct these shortcomings.

**Purpose of the work.** Development of a method for stabilizing the contour milling process on CNC machines.

**Research objectives:**

1. Design a control program written in G-codes in the CAM system.
2. Create an application program for creating arrays of points of tool trajectories.
3. Generate arrays of tool trajectories.
4. Model the machining processes.
5. Create a control program that, taking into account MRR, stabilizes the contour milling process.

**Object of research.** Contour milling process.

**Subject of research.** Stabilization of contour milling conditions on a CNC machine.

**Scientific novelty of the obtained results.** The results of the scientific study can be used to stabilize the conditions of contour milling on CNC machines and

further optimize the processing process. During the dissertation, a digital array of tool trajectory points was created and contour milling conditions were stabilized using a control program previously created by the CAM system.

### **Testing the results of the thesis and publications.**

During the work on the master's thesis, two abstracts of the report and two articles were published at the conference of young scientists and students "Innovations of youth in mechanical engineering" and one article in the publication « Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute" »

Petrakov Y. V., Myhovych A. V., IMachining technology analysis for contour milling. Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute". 2020. vol. 89, №2. P.114-120. DOI:

<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202065>

Myhovych A. V., Petrakov Y. V., Stabilization of the cutting mode by SAM-systems [electronic resource] / collection of works of the International Scientific and Technical Conference of young scientists and students "Innovations of youth in mechanical engineering", 2020 Innovations of youth in mechanical, engineering Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine". - 2020. - Resource Access mode:

<http://imm-mmi.kpi.ua/imm2020/paper/view/21431>

Myhovych A. V., Petrakov Y. V., Technology of programming milling contours for CNC machines [electronic resource] / collection of works of the International Scientific and Technical Conference of young scientists and students "Innovations of youth in mechanical engineering", 2021 Innovations of youth in mechanical engineering, Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine". - 2021. - resource access mode:

<http://imm-mmi.kpi.ua/imm2021/paper/view/23550>

Myhovych A. V., Petrakov Y. V., iMachining technologies for CNC machines. International scientific and Technical Conference of young scientists and

students " Innovations of youth in mechanical engineering ", 2020 Innovations of youth in mechanical engineering, Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine". - 2020. - Resource Access mode: <http://ampr.diit.edu.ua/index.php/wissn087/article/view/201962>

**Keywords.** CUTTING CONTROL, STABILIZATION, MRR, CONTOUR MILLING ON CNC MACHINES, DIGITAL ARRAYS OF THE TOOL PATH.

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Стабилизация условий контурного фрезерования на станке с ЧПУ» состоит из 84 листов формата А4 и содержит 30 иллюстрации, 17 таблиц, 1 приложение. При написании работы были использованы 31 литературных источников среди которых методические указания, пособия, справочники, каталоги, научные работы, статьи.

**Актуальность темы.** Сейчас процесс контурного фрезерования происходит на станке с ЧПУ, что обрабатывает по управляющей программе, которая создается в САМ-системах (Computer Aided Manufacturing). Несмотря на несомненный прогресс в программировании управляющих программ, они имеют некоторые недостатки, связанные с отсутствием в априорной информации, главной характеристики процесса резания - скорости удаления припуска (MRR - Material Removal Rate). Таким образом стабилизация управления по MRR позволит исправить эти недостатки.

**Цель работы.** Разработка метода стабилизации процесса контурного фрезерования на станках с ЧПУ.

**Задачи исследования:**

1. Спроектировать в САМ-системе управляющую программу, записанную в G-кодах.
2. Разработать приложение для создания массивов точек траекторий движения инструмента.
3. Сформировать массивы траекторий движения инструмента.
4. Моделировать процесс обработки
5. Создать управляющую программу, что, учитывая MRR стабилизирует процесс контурного фрезерования.

**Объект исследования:** процесс контурного фрезерования.



**Предмет исследования:** стабилизация условий контурного фрезерования на станке с ЧПУ.

**Научная новизна полученных результатов.** Результаты научного исследования могут быть использованы в стабилизации условий контурного фрезерования на станках с ЧПУ и дальнейшей оптимизации процесса обработки. В ходе выполнения диссертации был создан цифровой массив точек траектории движения инструмента и проведена стабилизация условий контурного фрезерования по предварительно созданной САМ-системой управляющей программе.

**Апробация результатов диссертации и публикации.** Во время работы над магистерской диссертацией были изданы две тезисы доклада и две статьи на конференции молодых ученых и студентов «Инновации молодежи в машиностроении» и одна статья в издании «Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт"»:

Мигович А. В., Петраков Ю.В. Стабилизация режима резки САМ-системами [Электронный ресурс] / Сборник трудов Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Инновации молодежи в машиностроении», 2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механико-машиностроительный институт национального технического университета Украины ". - 2020. - Режим доступа к ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2020/paper/view/21431>

Мигович А. В., Петраков Ю.В. Технология программирования фрезерования контуров для станков с ЧПУ [Электронный ресурс] / Сборник трудов Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Инновации молодежи в машиностроении», 2021 Youth Innovations in Mechanical Engineering механико машиностроительный институт Национального технического университета Украины ". - 2021. - Режим доступа к ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2021/paper/view/23550>

Мигович А. В., Петраков Ю.В. Технологии iMachining для станков с ЧПУ. Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Инновации молодежи в машиностроении», 2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механико-машиностроительный институт Национального технического университета Украины ". - 2020. - Режим доступа к ресурсу: <http://ampr.diit.edu.ua/index.php/wissn087/article/view/201962>

Петраков Ю.В., Мигович А.В. Анализ технологий iMachining для контурного фрезерования // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машинобудування. 2020. Т.89, №2. С.114-120. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202065>.

Ключевые слова. УПРАВЛЕНИЕ РЕЗАНИЕМ, СТАБИЛИЗАЦИЯ, MRR, КОНТУРНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ, ЦИФРОВЫЕ МАССИВЫ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА.

# ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 13 |
| Розділ 1. Аналіз .....   | 13 |
| 1.1 Особливості контурного фрезерування .....  | 14 |
| 1.1.2 Оптимізація процесу різання .....  | 16 |
| 1.2 Швидкість видалення матеріалу MRR.....   | 19 |
| 1.3 Реалізація методів управління в САМ-системах .....   | 19 |
| 1.3.1 Управління за апостеріорною інформацією .....  | 20 |
| 1.3.2 Реалізація управління за поточною інформацією.....   | 22 |
| 1.3.3 Реалізація управління за апріорною інформацією.....  | 24 |
| 1.4 Аналіз провідних САМ-систем на ринку .....   | 29 |
| 1.4.1 Аналіз Vortex від Autodesk PowerMILL.....  | 29 |
| 1.4.2 Аналіз Dynamic Motion від MasterCAM.....   | 34 |
| 1.4.3 Аналіз OptiPath від CGTech.....  | 36 |
| 1.4.3 Аналіз iMachining від SolidCAM .....   | 38 |
| 1.5 Висновки .....   | 41 |
| Розділ 2. Розробка програми для автоматичного проектування цифрових масивів траєкторій формоутворення..... | 42 |
| 2.1 Передумова розробки програми .....   | 42 |
| 2.2 Розроблення алгоритму, розрахунки цифрових масивів .....   | 43 |
| 2.3 Інтерфейс розробленої програми.....  | 46 |
| 2.4 Проведення моделювання .....   | 47 |
| 2.5 Висновки .....   | 48 |
| Розділ 3. Стабілізація умов контурного фрезерування на верстатах з ЧПК... 50                               |    |
| 3.1 Аналіз можливостей стабілізації умов різання в модулі iMachining.....                                  | 50 |
| 3.1.1 Створення управляючої програми в G-кодах для моделювання .....                                       | 50 |
| 3.1.2 Вибір вихід даних моделювання .....  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| 3.1.3 Моделювання процесу контурного фрезерування.....              | 52 |
| 3.2 Стабілізація умов контурного фрезерування .....                 | 58 |
| 3.3 Висновки .....  | 59 |
| Розділ 4. Розробка стартап проекту.....                             | 60 |
| 4.1 Вступ розробки до стартап проекту .....                         | 60 |
| 4.2 Опис ідеї проекту стартапа .....                                | 61 |
| 4.3 Визначення сильних, нейтральних і слабких сторін стартапу ..... | 62 |
| 4.4 Технологічний аудит проекту .....                               | 63 |
| 4.5 Аналіз можливостей стартапу на ринку .....                      | 65 |
| 4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту .....        | 76 |
| 4.7 Висновки .....  | 78 |
| Висновки .....  | 79 |
| Список використаних джерел .....                                    | 80 |
| Додатки.....  | 84 |

## ВСТУП

Процес контурного фрезерування характеризується перманентною зміною умов геометричної взаємодії фрези і заготовки, що викликає відповідну реакцію у вигляді зміни сили різання, деформацій технологічної обробної системи (ТОС) тощо[30]. Різні САМ-системи (Computer Aided Manufacturing) широко використовуються для створення керуючих програм для верстатів з ЧПК.

Використання таких систем на практиці показало, вони не враховують особливості процесу різання при створенні управляючої програми, особливо при обробці складних поверхонь деталей машин. Призначення режимів різання повністю довірено програмісту-технологу, який призначав режим з власного досвіду або за рекомендаціями виробників інструментів. Хоча зміна умов різання по траєкторії формоутворення провокує певні проблеми, вирішення яких на практиці зводилося до призначення найгіршого режиму, що був розрахований для всієї траєкторії [19]. Отже, здатність верстата з ЧПК, постійно контролювати будь-які параметри режиму різання взагалі не використовувалася, що приводить до значної втрати продуктивності.

Не зважаючи на безсумнівний прогрес провідних розробників САМ-систем в створенні управляючих програм, вони мають деякі вади, пов'язані з відсутністю в апіорній інформації, головної характеристики процесу різання – швидкості видалення припуску (MRR – Material Removal Rate) [19]. Тому потрібно розробити систему автоматизованої підготовки керуючих програм, яка б автоматично вирішувала не тільки геометричну задачу проектування траєкторій формоутворення, а й управління процесом різання.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ

### 1.1 Особливості контурного фрезерування

На рис. 1.1, а ілюстроване контурне оброблення будь-яким інструментом, який має початкову інструментальну поверхню у формі циліндра. Процес формоутворення відбувається шляхом різання контуру 1 деталі ( $P$  – початок та  $K$  – кінець контуру), та заготовка відображає абсолютно еквідистантний припуск (лінія 2). Опираючись на геометричні умови формоутворення, центр інструменту здійснює рух по еквідистанті 3, у напрямку до оброблюваної поверхні. Очевидно, умови силової взаємодії інструменту та заготовки визначатимуться за допомогою параметрів шару припуску, що зрізається, залежними від дуги контакту  $AB$ , довжина та розміщення якої за різних положень інструменту істотно розрізняються. Тому, вектор  $P$  сили різання теж змінює свою величину та напрям в площині  $YOX$ . Вектор сили різання на рис. 1.1, а зображено у припущенні руху по еквідистанті із постійною подачею  $S_e$ . Відомо, майже для всіх різновидів обробки головним чинником, який визначає якість оброблюваної поверхні, являється інтенсивність  $Q$  зрізування припуску, що залежить від довжини дуги контакту. На рис. 1.1, б графік зміни цього найбільш важливого параметра процесу різання за розгорткою довжини еквідистанти. Очевидно, що цей процес є квазістаціонарним, та це обов'язково призведе до істотних змін властивостей оброблюваної поверхні за її довжиною (шорсткість та фізико-механічні властивості поверхневого шару, тощо). З огляду на те, що інтенсивність зрізування припуску залежить і від подачі  $S_e$  по еквідистанті центру інструменту, то з'являється можливість стабілізувати інтенсивність зрізування припуску за рахунок управління подачею. На рис. 1.1, б передбачений

закон управління подачею  $S_e$  за еквідистантою, для даного випадку. Він впливає з умови найбільш максимального наближення умов контурної обробки до умови обробки поверхні з постійною кривизною. У результаті інтенсивність зрізання припуску по всіх ділянках контуру буде однаковою. Наступає момент виконання головної мети управління: як найбільш мінімізувати час обробки. Тут, безперечно, повинно вирішуватись завдання оптимізації, бажано у такому формулюванні, яке дозволить вважати її однокритеріальною. Приміром, вибрано такий рівень зміни подачі  $S_e$  за еквідистантою (тобто «середню» величину  $S_o$ ), щоб під час максимальної продуктивності задовольнялись усі умови точності та якості оброблюваної поверхні. На рис. 1.1, в позначено можливий метод розв'язання такої задачі за рахунок переміщення одержаного закону управління подачею  $S_e$  в положення, що відповідає оптимальному рівню «середньої» подачі  $S_o$ . Вирішуючи стандартну задачу нелінійного програмування для поверхні постійної кривизни визначається оптимальна величина «середньої» подачі [31].

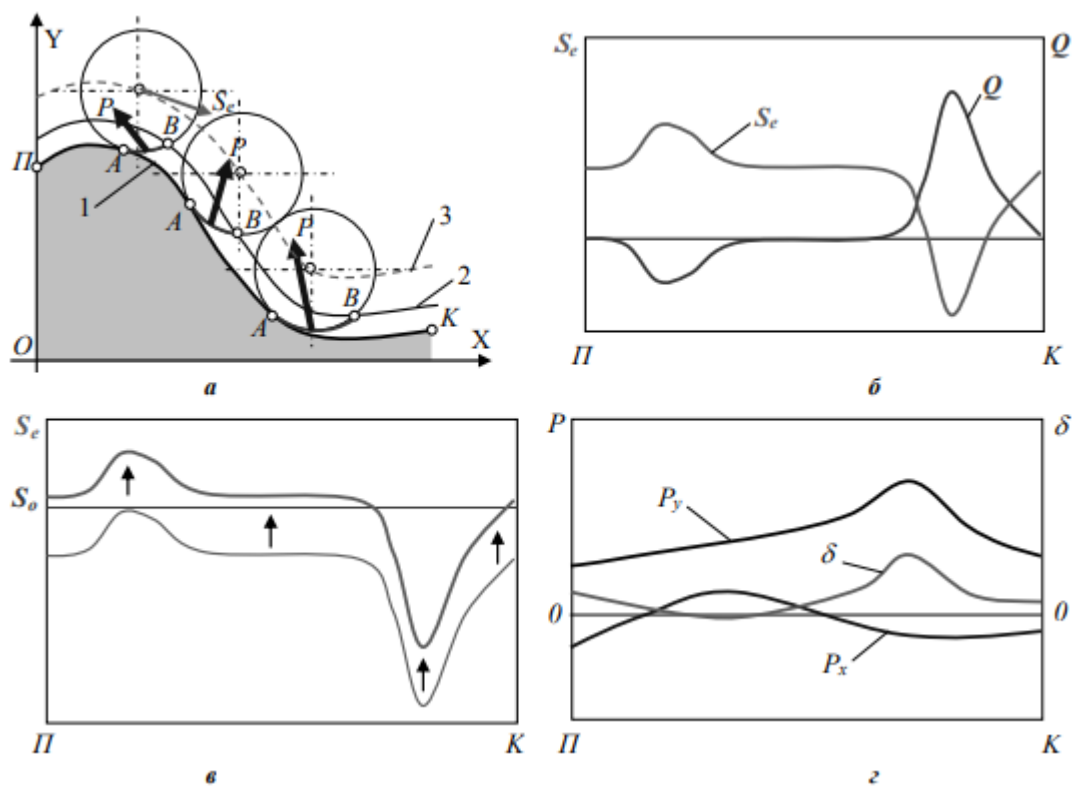


Рисунок 1.1 – Приклад управління при контурній обробці [31]

Однак таке управління хоча і призводить до вирівнювання умов різання по контуру та оптимізації процесу за прийнятим критерієм таким як мінімальний час обробки, але воно не зможе повністю стабілізувати силу різання через різний вплив інтенсивності, подачі на силові та якісні характеристики процесу. Поза тим, взагалі не варто очікувати стабілізації складових  $P_x$  і  $P_y$  сили різання бодай через зміну напрямку вектора сили в площині  $XOY$  (рис. 1.1, г). До того ж, жорсткості пружної ТОС за різними напрямками завжди різні та пружні деформації, викликані складовими сили різання, є також різні. Пружні деформації мають різний вплив на формування похибки  $\delta$  обробки, що вимірюється по нормалі до контуру. Через це все виникає необхідність ввести третю дію, що управляє, на зразок корекції траєкторії руху центру інструменту, що вже не буде еквідистантною.

Вищерозглянутий приклад досить переконливо показує те, що формування управлінь, для будь-якого процесу обробки різанням має обов'язково здійснюватися в строгій послідовності, а саме [31]:

1. Стабілізація умов різання;
2. Оптимізація процесу різання;
3. Корекція формоутворювальної траєкторії.

### **1.1.2 Оптимізація процесу різання**

Оптимізація процесу різання повинна відбуватись у процесі вирішення класичним завданням, бажано однокритерійним. У такому випадку у якості критерію приймають продуктивність - до максимуму, а усі вимоги за якістю виносяться у обмеження. Повідомлення рекламного характеру [9], що обіцяють максимальну продуктивність під час збільшення стійкості інструменту, у такій постановці завдання є досить суперечливими.



Так, теоретично, при заданих умовах обробки існують такі постійні значення складових режиму різання, що приводять до максимуму продуктивності під час дотримання усіх заданих обмежень. Однак, на практиці, при виконанні різних процесів різання, особливо під час обробки складних поверхонь, жоден з параметрів не залишиться постійним. Тому, вбачається, що етапу оптимізації обов'язково передує етап стабілізації.

Розробка математичної моделі процесу різання це найважливіший етап створення алгоритму оптимізації [9]. При традиційному, тобто, класичному підході, математична модель вибудовується у вигляді системи рівнянь та нерівностей, що висловлюють зв'язку між керуючими впливами та обмеженнями, прийнятим критерієм оптимальності на основі класичної залежності теорії різання.

Математична модель, яка отримана [9] використана в прикладній програмі, що розроблена кафедрою машинобудування НТУУ «КПІ», інтерфейс котрої показаний на рис.4. Лінії 1 і 2 - максимальна та мінімальна частота обертання шпинделя, також лінії 3 і 4 - обмеження по максимальній та мінімальній подачі верстата, лінія 5 - обмеження по допустимій шорсткості поверхні, лінія 6 - обмеження по стійкості інструменту, лінія 7 - обмеження по потужності верстату, лінія 8 - обмеження по максимально допустимій силі подачі.

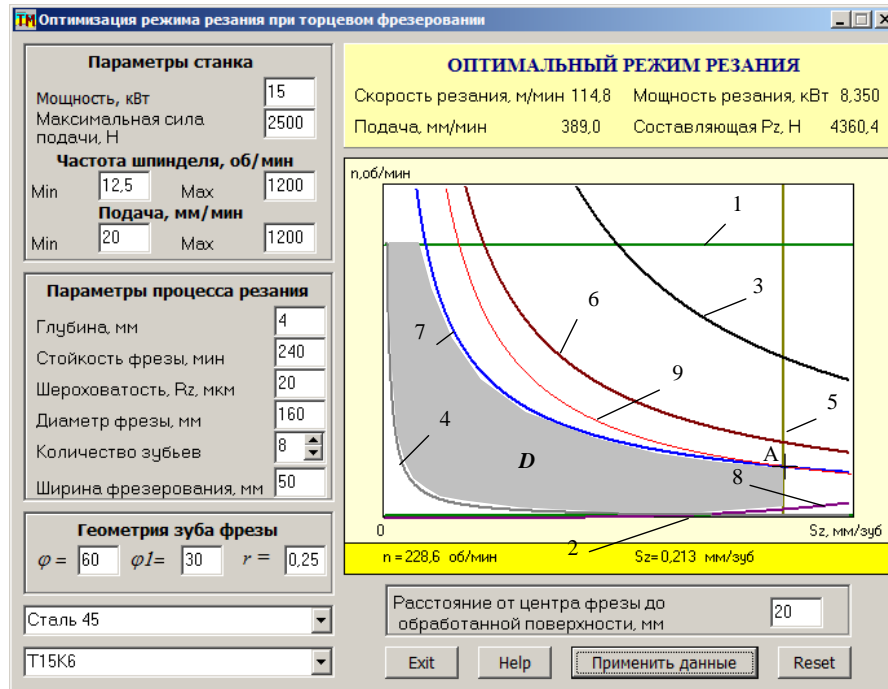


Рисунок 1.2 - Интерфейс програми оптимізації [9]

Позначена зона D допустимих значень частоти обертання шпинделя та подачі на зуб фрези відповідає наведеним у інтерфейсі вихідним даним процесу різання. Оптимальне значення режиму різання відповідає точці A, у час коли оціночна функція досягає максимуму.

Отже, після процесу проектування управління, що стабілізує процес різання, середній рівень зміни такого управління, візьмемо по подачі, повинен визначатись у результаті рішення задачі оптимізації.

З представленого вбачається, що для здійснення оптимізації процесу різання в САМ-системі необхідні дані про характеристику ТОС, що можуть бути одержані тільки під час використання поточної інформації у конкретний момент часу. Через це, найбільш просунуті САМ-системи, можуть надавати технологу-програмісту можливість апіорної оцінки жорсткості ТОС, щонайменше по восьми рівнях [9]. Отже, зрозуміло, що для коректного вирішення поставленої задачі оптимізації в умовах перманентної зміни характеристик ТОС потрібно використовувати адаптивні системи [9].

## **1.2 Швидкість видалення матеріалу MRR**

Швидкість видалення матеріалу (Material Removal Rate) – це кількість видаленого матеріалу за одиницю часу (зазвичай за хвилину) при виконанні операцій механічної обробки, таких як використання токарного верстата або фрезерного верстата. Це прямий показник того, наскільки ефективно видаляється матеріал. MRR – це обсяг матеріалу, що вилучається за хвилину. Чим вище параметри різання, тим вищий коефіцієнт MRR.[1]

Швидкість видалення матеріалу являє собою геометричну характеристику процесу різання і визначає об'єм матеріалу, що зрізується за одиницю часу – розмірність  $\text{м}^3/\text{с}$ . Таким чином, в цю характеристику входять складові режиму різання, такі як швидкість подача та глибина.[9]

## **1.3 Реалізація методів управління в САМ-системах**

Не можливо уявити сучасне машинобудування без використання верстатів з ЧПК, а технологічну підготовку виробництва – без САМ-систем (Computer Aided Manufacturing), котрі автоматизують проектування управляючих програм [2]. Ринок високих технологій, наразі, заповнений САМ-системами. Лідерами по продажі ліцензій на свою продукцію займають Dassault Systemes, MasterCAM, SolidCAM та Autodesk (колишній Delcam) [3]. Розробники стверджують, що застосовуючи їх продукти можна покращити умови механічного оброблення, підвищити продуктивність та зменшити знос інструменту.

Визнаючи практичну необхідність контролю процесу різання, провідні фірми на ринку високих технологій почали пропонувати програмні продукти,

які, як стверджувалося, в автоматичному режимі могли розрахувати оптимальний режим різання.

Відомо, що управління режимом різання повинно здійснюватися за наступним алгоритмом: спочатку стабілізація, потім оптимізація і, при необхідності, корекція траєкторії в останньому, чистовому проході [19].

Теорія автоматизованого управління говорить нам про те, що існує два принципи управління: по помилці та збуренні [4]. Також, можна виділити три основних методи управління: за апіорною, поточною і апостеріорною інформацією [5].

### **1.3.1 Управління за апостеріорною інформацією**

Використання такого метода управління застосовується переважно для підвищення точності через корекцію траєкторії формоутворення.

Такий метод є дієвим, оскільки при обробленні на верстатах з ЧПК левову частку похибки при виготовленні деталі спричиняє деформація технологічної оброблюваної системи (ТОС). З цього виникають можливості провести розрахунок деформації за апостеріорною інформацією. Хоча одержання точної інформації про жорсткість ТОС під час виконання конкретної операції є проблематичним. Тому, для корекції траєкторії формоутворення використовуються результати вимірювання уже оброблених деталей, а при обробці складних, одиничних виробів в одиничному виробництві використовуються результати вимірювань після пробного проходу [10]. Потрібно зазначити, спосіб корекції ЧПК «на радіус», який практикується, у цьому випадку непридатний.

Управління за таким методом розроблене кафедрою технологій машинобудування НТУУ «КПІ» [10]. Головною метою метода є забезпечення точності, тому параметр управління вибирається глибина різання. Наведена структурна схема рис 1.3, на якому  $H_z$  – задана,  $H_{zl}$  – скорегована,  $\delta H$  –

випадкова складова,  $H_\phi$  – фактична глибина різання,  $\delta$  – пружна деформація в еквівалентній пружній системі, що має передатну функцію  $W_{enc}$ , на яку діє відповідна складова  $P$  сили різання, що виникла в результаті процесу різання з передатна функція  $W_{np}$ . В такій системі запізнення записується передатною функцією  $be^{-\tau s}$ , де  $b$  – коефіцієнт корекції,  $\tau$  – час циклу, що включає в себе обробку та вимірювання деталі,  $s$  – оператор Лапласа [10].

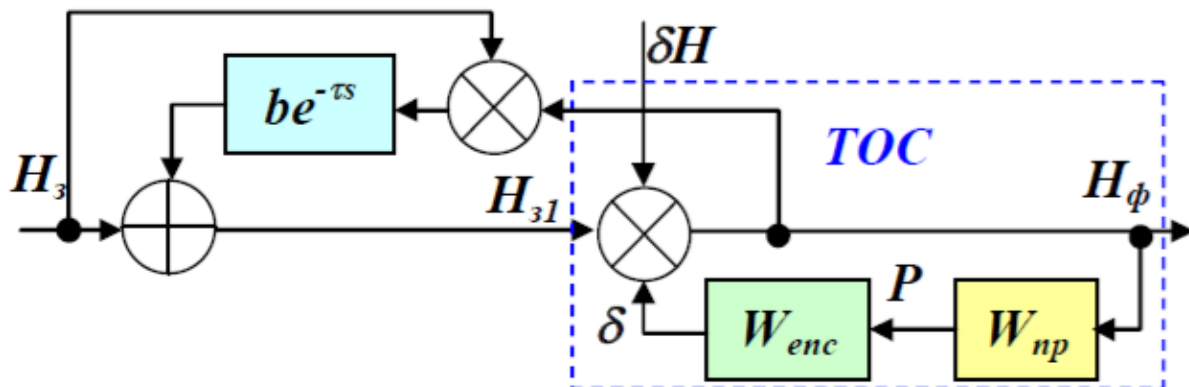


Рисунок 1.3 – Схема управління за апостеріорною інформацією [10]

Сутність цього управління полягає в тому, що координата, яка була виміряна після завершення обробки деталі  $h_\phi$ , порівнюється з заданою  $h_z$  на кресленні чи 3Д моделі, через передатну функцію запізнення:

$$h_{z1} = (h_z - h_\phi)be^{-\tau s} + h_z \quad (1.1)$$

Управління за таким методом може здійснюватися, як в ручному «режимі» так і в автоматичному режимі управління. Автоматичний режим, передбачає створення комплексу, що вимірює оброблену деталь та через спеціально створену процедуру передає інформацію на верстат з ЧПК для подальшої корекції позиції інструмента на величину очікуваної похибки.

Таке управління є доцільним при виготовленні великих партій деталей, але якщо виконується оброблення однієї деталі, то тоді використання такого алгоритму управління є недоцільним. Для вирішення цієї проблеми використовується інший підхід [22], в ньому також застосовується метод

управління за апостеріорна інформація. Головна ідея цього підходу полягає в тому, що під час оброблення, припуск розділяється як мінімум на два проходи, а корекція на останньому проході відбувається за результатами вимірювання заготовки після попереднього проходу.

Реалізація такої методики можливе за рахунок використання спеціальної програми [21], в яку завантажується інформація виміряна з заготовки після попереднього проходу. Після моделювання програма створює масив похибок, які викликані пружною деформацією і відповідно до методу управління за апостеріорною інформацією формується цифровий масив координат скорегованої траєкторії. Він зберігається у спеціальному проміжному файлі і далі передається на відповідний верстат з ЧПК через пост процесор.

### **1.3.2 Реалізація управління за поточною інформацією**

Процес різання за поточною інформацією був стабілізований ще в 80-х роках радянськими вченими школи Б.С. Балакшина [10], але недостатня розвиненість технологій того часу не дозволила довести експериментальні зразки до промислового застосування. На сьогоднішній день, цей метод управління був реалізований американська компанія Omative System [6]. Система побудована на використанні поточної інформації.

Головна ідея, що реалізується в САМ-системі полягає в тому, що згідно з інформацією, що отримана від датчиків верстата в процесі обробки (наприклад потужності двигуна головного руху верстата з ЧПК) змінюється (перепишується) подача, значення якої було попередньо задане в управляючій програмі в G-кодах.

Такий метод управління може приводити до стабілізації процесу різання, що гарантовано підвищує продуктивності при різних видах обробки. Це пояснюється тим, що як правило, подача підбирається технологом-

програмістом маючи за основу найгірші поєднання умов різання. Середнє значення рівня подачі при управлінні з стабілізацією потужності різання буде значно вищим, а це означає, збільшується продуктивність обробки (рис 1.4).



Рисунок 1.4 – Інтеграція OMATIVE ACM в ЧПК [7]

Постільки, застосовується поточне управління безпосередньо через системи ЧПК та контролери приводів, компанія має адаптацію свого продукту до різних виробників верстатів: Siemens, Fanuc, Heidenhain.

Такий метод управління також застосовується в розробках кафедри технологій машинобудування НТУУ «КПІ» [10]. Було, доведено, що розроблене програмне забезпечення дозволяє, правильно розпізнавати різні характеристики на верстаті з ЧПК. Дослідами була підтверджена можливість програмного забезпечення виконувати роль каналу зворотного зв'язку в системі автоматичного процесу різання [23].

Функціональна схема автоматизованої системи управління процесом різання в реальному часі на верстаті ЧПК, передбачає використання деяких характеристик верстату з ЧПК (наприклад,  $P$  потужності), яка має можливість змінюватися під час оброблення, в якості цілі управління і автоматичної зміни впливу на процес різання (наприклад,  $F$  подачею) для стабілізації цієї характеристики на заданому рівні (рис 1.5) [2].

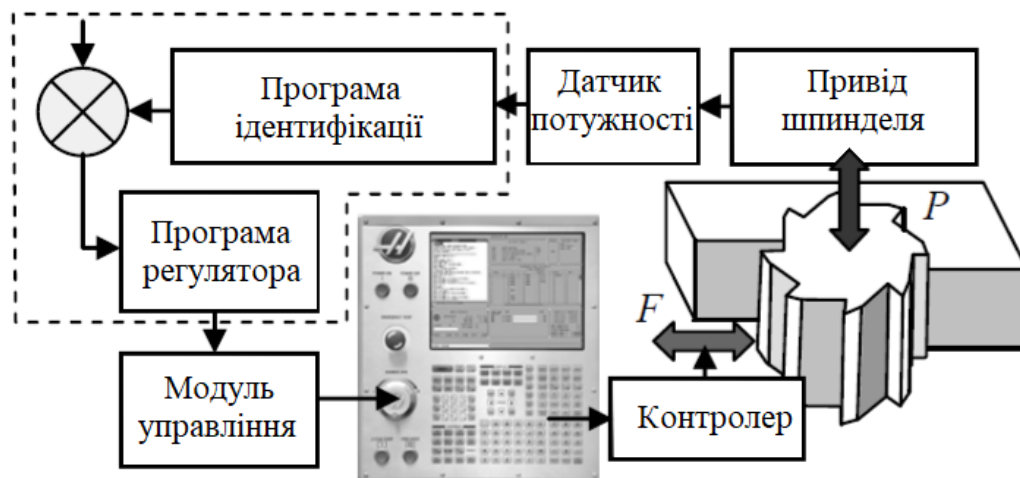


Рисунок 1.5 – Функціональна схема [2]

Частина функціональних блоків автоматизованої системи управління, що показані на рис 1.5 та обведені пунктиром, реалізується через створення програмного забезпечення, а модуль управління взаємодіє з верстатом ЧПК через стандартний роз'єм аналогічно ручному управлінню маховиком котрий зменшує чи збільшує поточну подачу.

### 1.3.3 Реалізація управління за апіорною інформацією

Таке управління найчастіше застосовується в провідних САМ-системах. Перш за все, це зв'язано з тим, що для застосування такого методу розробники не потребують втручання в роботу верстату (датчиків, контролерів), що інтегровані у верстат ЧПК. Як приклад, цього вимагає метод управління за поточною інформацією. Також, метод управління за апостеріорною інформацією є досить трудомістким, оскільки для використання його потрібно одержувати достовірні відомості про жорсткість ТОС. Таке отримання інформації є проблемним, тому, зазвичай, обмежуються вимірюванням уже готових деталей.



Головна ідея методу управління за апіорною інформацією полягає в тому, що САМ-система проектує керуючу програму для верстату з ЧПК на підставі вихідних даних, таких як поверхня деталі, що потрібно обробити, заготовка, інструмент та деяких інших, відомих на цьому етапі даних. Метою такого управління є стабілізація за критерієм швидкості видалення припуску (MRR – Material Removal Rate) [8].

В замкненій технологічній системі (ТОС) під час дослідження процесу формоутворення визначають модифікацію передатних функцій  $W_{np}$  процесу оброблення та  $W_{enc}$  еквівалентної пружної системи, що апіорі передбачають та розраховують швидкість зрізування  $Q_{z1}$ , як функцію подачі. Таким чином, щоб під час різання забезпечувався збіг фактичної  $Q_{\phi}$  швидкості із заданою  $Q_{z1}$  під час оброблення [10]. Для кращого розуміння використовується схема (рис.1.6).

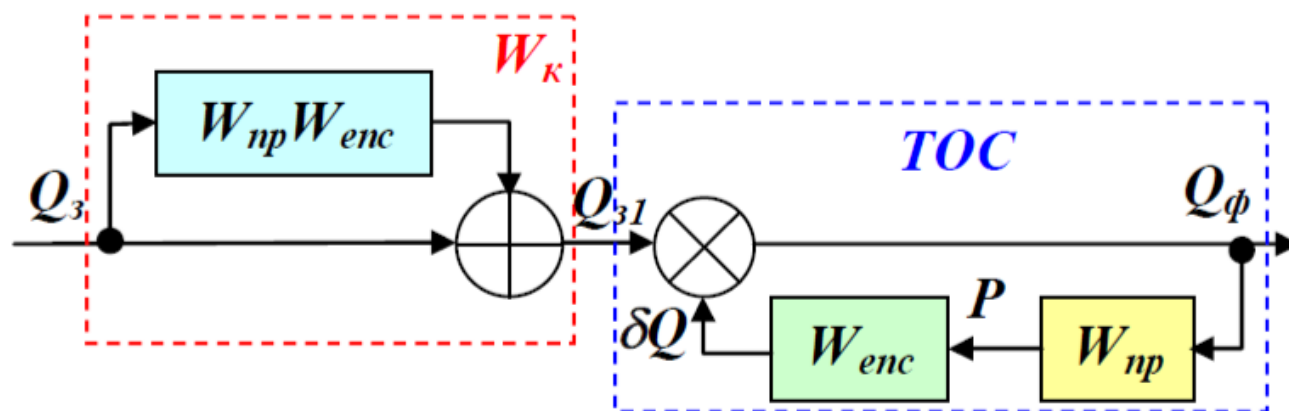


Рисунок 1.6 – Схема управління за апіорною інформацією [10]

Із схеми, маємо:

$$Q_{\phi} = Q_{z1} \frac{W_{\kappa}}{1 + W_{np} W_{enc}} \quad (1.2)$$

Для досягнення управління у канал регулювання вводиться коригуючий елемент з передатною функцією  $W_{\kappa}$ :

$$Q_{31} = Q_3 W_k \quad (1.3)$$

Отримаємо після підстановки (1.2) у (1.3):

$$Q_\phi = Q_3 \frac{W_k}{1 + W_{np} W_{enc}} \quad (1.4)$$

Метод передбачає, що унаслідок корекції буде забезпечено  $Q_\phi = Q_3$ . Для виконання рівності приймається, що:

$$W_k = 1 + W_{np} W_{enc} \quad (1.5)$$

Передатна функція указана виразом (1.4) відповідає з'єднанню елементів вказаних на (рис. 1.6).

Метод вимагає реалізації коригуючого елементу під час підготовки управляючої програми заданою переміщенням інструменту. Отже, цей метод управління передбачає використання верстатів з ЧПК. Оскільки система управління є розімкненою, тому її ефективність цілковито залежить від точності наданої апіорної інформації.

Головним критерієм, що показує ефективність процесу різання є швидкість видалення припуску (MRR), тому при проектуванні керуючої програми необхідно визначити характеристику за аналогом – об'ємом видаленого припуску (MRR), який в свою чергу пов'язаний з траєкторією інструменту, щоб потім провести стабілізацію процесу різання за критерієм MRR управлінням подачею інструмента за траєкторією формоутворення. Об'єм припуску, що має зрізатися буде визначений під час етапу моделювання процесу оброблення заготовки на етапі проектування керуючої програми.

Як правило, САМ-системи у своєму складі, мають модуль візуалізації спроектованого процесу оброблення деталі, але з них не можливо одержати потрібну інформацію про процес різання.

Отже, для розв'язання задачі управління за апіорним методом, необхідно створити модуль САМ-системи, який зможе збирати апіорно

інформацію про геометрію заготовки, деталі, інструменту та траєкторію формоутворюючих рухів.

Розробкою такого модуля займалися спеціалісти кафедри технології машинобудування НТУУ «КПІ». Відповідно до алгоритму (рис.1.7), у якому зображено моделювання контурного фрезерування за допомогою циліндричного інструменту 1 заготовки 2 довільної форми, під час здійснення руху за траєкторією 3. Геометричний образ заготовки, зазначений у кресленні, трансформується на цифровий масив (умовно позначений кружками на рис. 1.7).

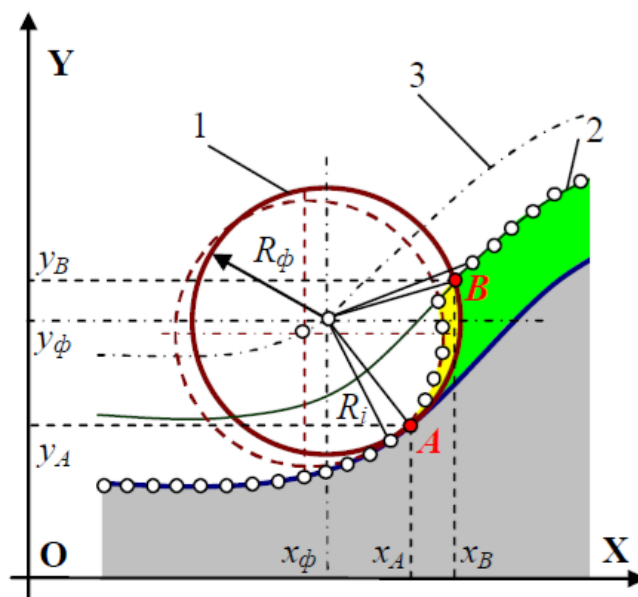


Рисунок 1.7 – Схема контурного оброблення [10]

Під час проведення моделювання за кожним кроком функціонує алгоритм, який визначає координати точок контуру заготовки, у тому місці де починається дуга різання (точка A) та де вона закінчується (точка B). Після цього починає функціонування спеціальна процедура, яка здійснює перерахунок контуру заготовки з урахуванням ділянки AB, яка створилася внаслідок видалення матеріалу заготовки саме на цьому кроці моделювання, та

підготовлює дію алгоритму на наступному кроці, з повторенням процедури, але вже з заміненим контуром заготовки.

Опираючись на практику, бачимо, що такий модуль має можливість визначати об'єм припуску, який зрізається, під час оброблення різних поверхонь, зокрема, враховуючи реальні форми фрез із зубцями, навіть при 3D-обробці [24]. Математична модель розроблена з урахуванням кута нахилу леза зуба фрези і товщину заготовки, а визначений у кожному кроці проведення моделювання об'єм матеріалу, що зрізається, враховує сумарну площу різання під час знаходження в зоні різання одного, двох та більше зубів фрези.

За отриманим масивом зміни об'єм припуску, що зрізується, для закріплення стабілізації процесу різання по всій траєкторії формотвірного руху здійснюється розрахунок масиву зміни подачі. Даний підхід, як варіант, був апробований на практиці та досить успішно довів свою ефективність [25].

Цей метод забезпечує стабілізацію процесу фрезерування, по основній його характеристиці – силі (потужності) різання, можливо застосовувати на будь-яких верстатах з ЧПУ без проведення тестування їх динамічних характеристик. Окрім того, врахувавши можливості моделювання процесу зрізування припуску кожним зубом, створюється передумова до здійснення оптимізації процесу різання, безпосередньо, підбору такого рівня середньої подачі і частоти обертання фрези, що при умовах дії обмежень, зокрема, за шорсткістю оброблюваної поверхні, дозволить забезпечити максимальну продуктивність.

Для практичного використання розроблених програм моделювання при розв'язанні проблем при стабілізації процесу контурного фрезерування потрібно здійснити забезпечення автоматизованого створення цифрових масивів траєкторій формоутворюючих рухів, які записані у G-кодах управляючої програми.

## **1.4 Аналіз провідних САМ-систем на ринку**

Визнаючи практичну необхідність контролю процесу різання, провідні фірми на ринку високих технологій почали пропонувати програмні продукти, які, як стверджувалося, в автоматичному режимі могли розрахувати оптимальний режим різання.

Відомо, що управління режимом різання повинно здійснюватися за наступним алгоритмом: спочатку стабілізація, потім оптимізація і, при необхідності, корекція траєкторії в останньому, вільному проході [17].

Однак перші спроби стабілізації режиму різання були реалізовані за геометричним критерієм.

### **1.4.1 Аналіз Vortex від Autodesk PowerMILL**

Delcam (тепер Autodesk PowerMILL) має запатентовану вихрову стратегію Vortex, що розроблена з використанням спеціальних трохіодальних траєкторій, при яких в ході процесу різання підтримуються постійний кут різання різця з заготовкою [2]. Проектування управляючої програми по цій стратегії відбувається взявши за основу апріорну інформацію, яка знаходиться у геометричних параметрах взаємної дії інструменту та заготовки [17].

Vortex позиціонується, як стратегія для проведення високошвидкісної обробки. Розробники стратегії стверджують, що час оброблення матеріалу зменшується на 60 % та, водночас, збільшується період стійкості інструмента [15]. Ефект був досягнутий за рахунок того, що кут різання при здійсненні оброблення контуру деталі з постійним (еквідистантним) припуском змінюється від 46 ° на прямолінійній ділянці, та відповідно до 91° на ділянці внутрішнього контуру (рис 1.8) [26]. Отже, стратегія виключає надмірні навантаження на інструмент та врізання повним діаметром. Також, стратегія

дозволяє збільшувати швидкості подачі і глибину врізання інструменту. Під час обрання належного інструменту, режими різання визначаються виходячи з рекомендації виробників.

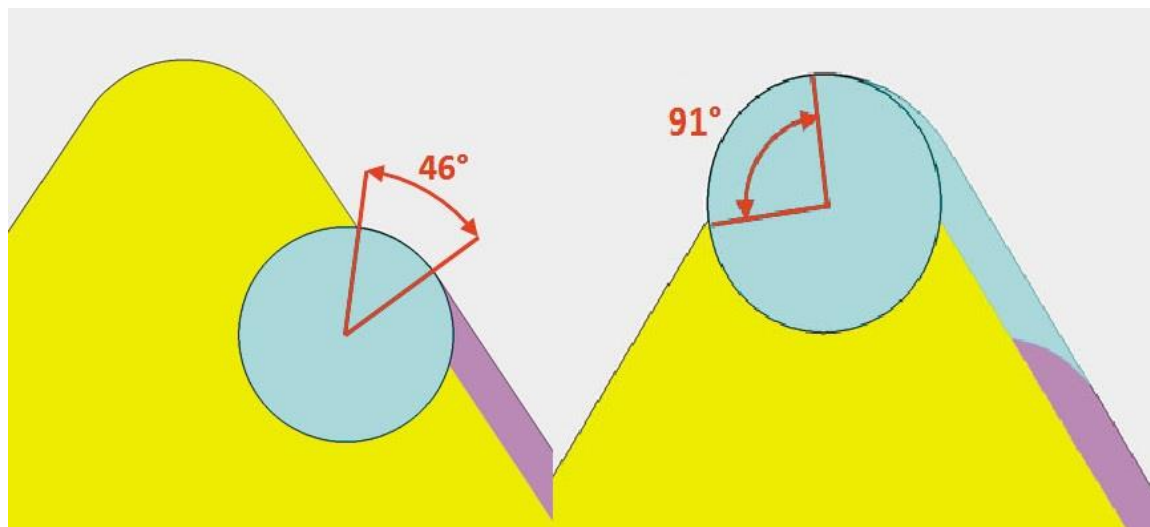


Рисунок 1.8 – Зміна кута різання при обробленні контуру деталі [26]

Коли підібраний інструмент підходить до максимального кута контакту, для оптимальної обробки траєкторія буде змінена на трохоїдальну (рис. 1.9), щоб не відбулось перевантаження інструменту. Як правило вона використовується при проведенні чорнової обробки (рис. 1.10). Головна концепція цієї траєкторії така – підтримувати постійно високу швидкість під час видалення відносно тонких шарів матеріалу.

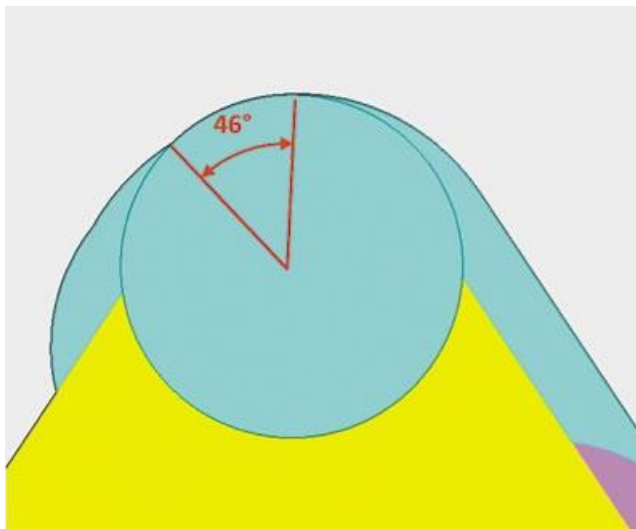


Рисунок 1.9 – Стратегія Vortex [26]

Під час обробки по стратегії Vortex, зазвичай обробка виконується за допомогою бокової частини фрези, оскільки стратегія була розроблена для цільних твердосплавних інструментів, але як варіант, можливе використання інших інструментів.

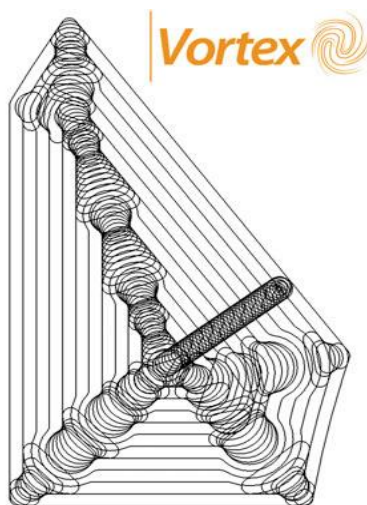


Рисунок 1.10 – Чорнова обробка замкнутого кармана із застосуванням стратегії Vortex [28]

Обробка Vortex дуже часто використовується в комбінації із ступінчастим різанням для зменшення уступів, при цьому збільшується швидкість видалення матеріалу. Також, програма в автоматичному режимі проводить перевірку безпечності траєкторії формоутворення.

Стверджують, що при застосуванні стратегії забезпечується стабілізація умов різання. Однак, із теорії різання візьмемо твердження відоме для всіх, що не існує пропорційної залежності між силою різання і кутом різання [2], тому стабілізація кута різання не може призвести до стабілізації основних характеристик процесу різання, таких як сила та потужність. Крім того бачимо, що траєкторії високошвидкісної обробки (HSM) спотворили їх.

Тому була розроблена додаткова програма під назвою Machine DNA Profiler (рис 1.11), що за результатами динамічних випробувань на конкретно визначеному обладнанні надає необхідні умови для використання зазначеного контролю.

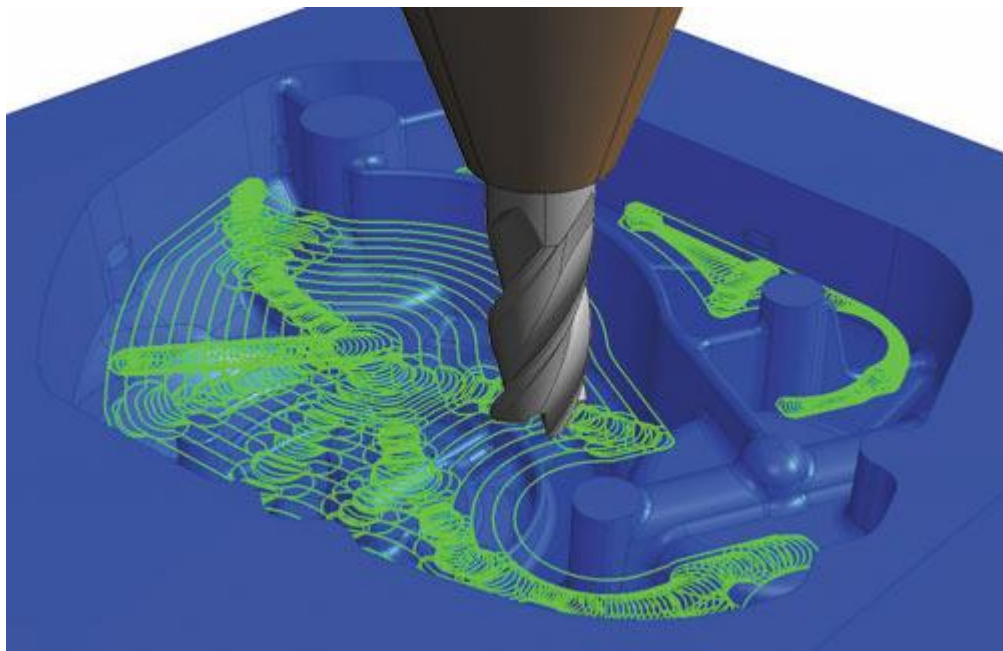


Рисунок 1.11 – Траєкторія оброблення створена за допомогою стратегії Vortex та Machine DNA Profiler [17]



Застосування такої програми можливе та доцільне, як при крупносерійному виробництві, де як зазвичай, і до її появи проводився цикл тестування і оптимізації управляючих програм, так і під час проведення дослідного або дрібносерійного виробництва.

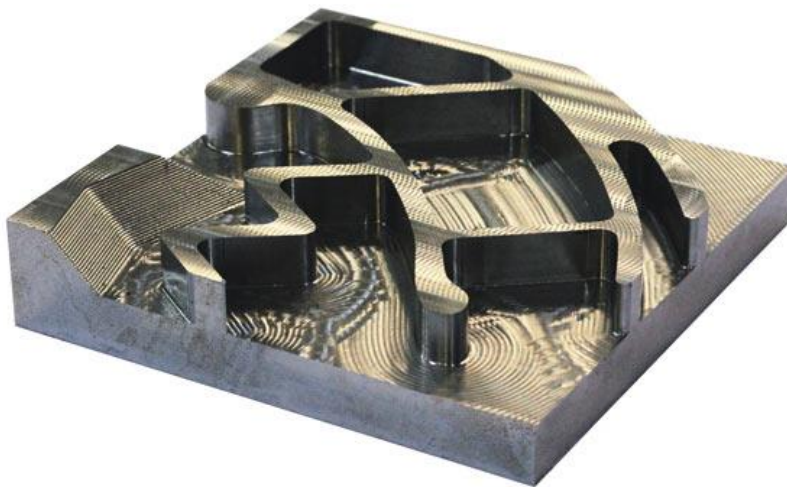


Рисунок 1.12 – Застосування стратегії Vortex і технології оптимізації ЧПУ-програм Machine DNA Profiler [17]

Machine DNA Profiler використовуючи серію стандартних тестів для різних верстатів може визначити їх оптимальні параметри та потім використовувати для створення високоефективних (рис 1.12) управляючих програм [17]. Такий підхід значно заощаджує час технолога-програміста, постільки він більше не буде, налаштовувати продуктивність обробки матеріалу за допомогою ручного підбору швидкості подачі та забезпечує прийнятну продуктивність.

В багатьох випадках, виробник на початку виготовляв кілька деталей на помірній подачі і швидкості, а потім поступально збільшував ці параметри для управляючої програми або її фрагменту. Таким чином намагаючись збільшити продуктивність обробки [17].

У результаті застосування Machine DNA Profiler маємо зменшення часу розроблення високоефективних управляючих програм, що забезпечить можливість відмовитись від процесу виготовлення тестових зразків.

Використання значної кількості програм для створення управляючих програм, а також їх недосконалість істотно ускладнюють практичне використання запропонованої технології [2].

#### **1.4.2 Аналіз Dynamic Motion від MasterCAM**

Dynamic Motion – це модуль CAM-системи MasterCAM. Розробники стверджують, що використання їхнього продукту значно збільшує термін служби інструменту, приводи верстата зазнають меншого зносу, зменшується час оброблювального процесу та підготовки до нього (проектування управляючих програм для верстату) на 25% – 75%, можливість використання на станках будь-якої потужності, відносно легка обробка деталей з твердих матеріалів [12].

Такі твердження виробники обґрунтовують використанням у своїй програмі феномену під назвою RCT (Radial Chip Thinning – зменшення товщини стружки в радіальному напрямку). Досягається це зменшенням кроку між проходами – він повинен бути менший, ніж 50% від діаметра фрези. Зменшується крок - зменшується знос інструменту, при постійному обсязі видаленого матеріалу.

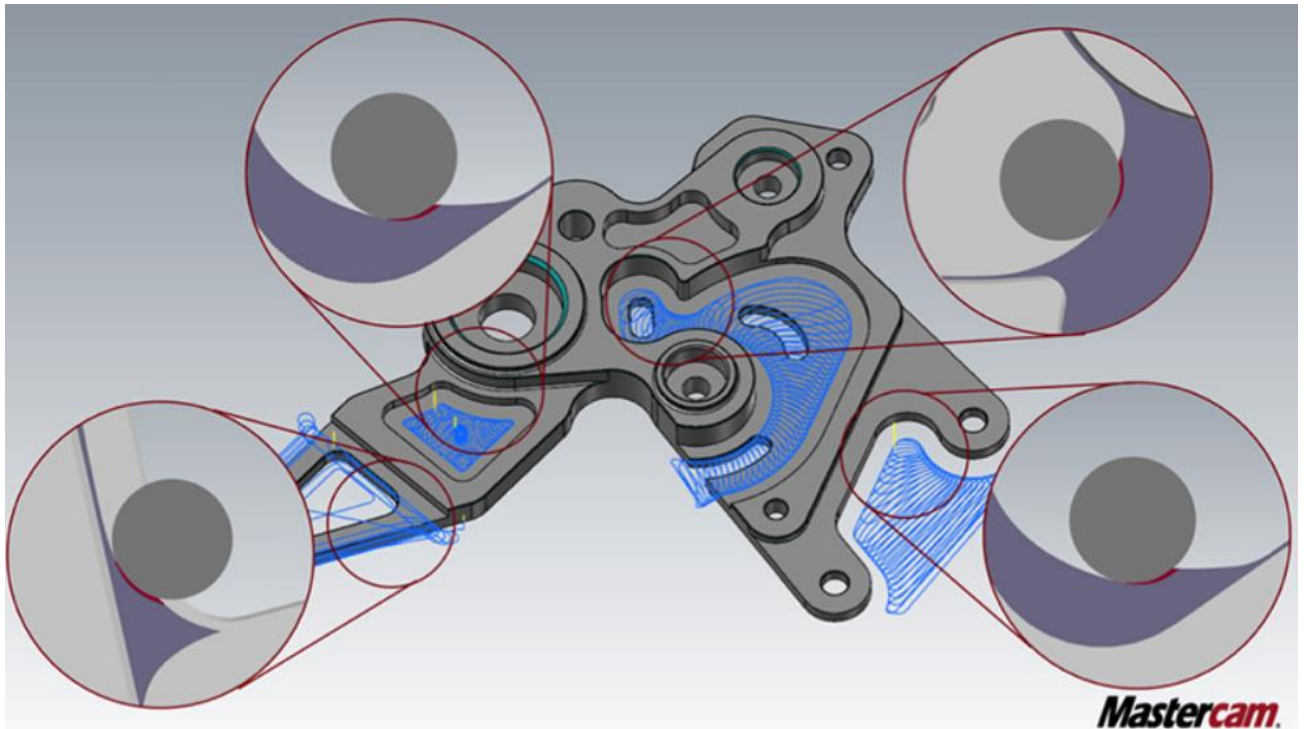


Рисунок 1.13 – Траєкторія руху інструменту побудована за допомогою MasterCAM Dynamic Motion [13]

При цьому, оскільки крок став меншим, для досягнення однакового обсягу (відведення згубного для інструменту тепла), необхідно збільшити подачу (рис 1.14, рис 1.15) [13].

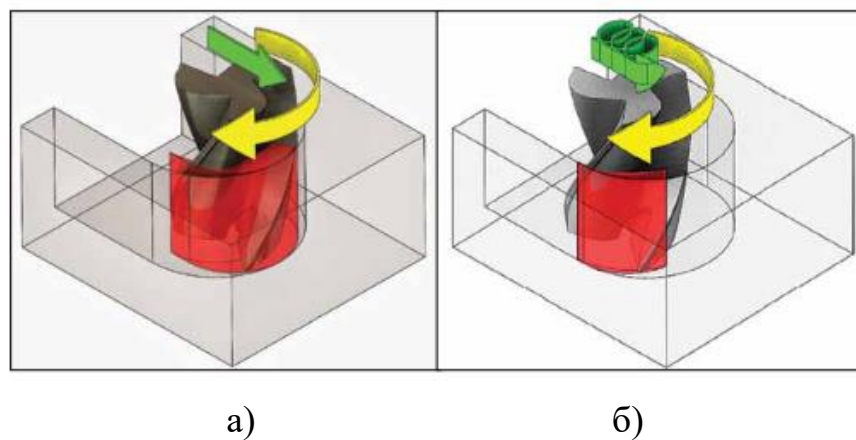


Рисунок 1.14 – Зняття стружка (червона зона)

а) - при традиційній обробці; б) – при динамічній обробці [13]

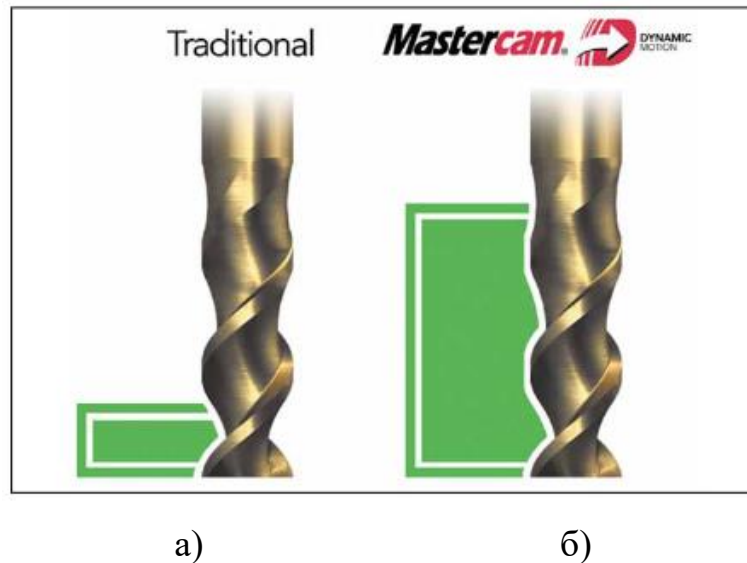


Рисунок 1.15 – Глибина врізання

а) при традиційній обробці знімання матеріалу передбачається не велика глибина врізування; б) при динамічній обробці глибина збільшується, аж до довжини ріжучої частини інструменту [13]

Такий підхід має свої недоліки, оскільки при використанні RCT (Radial Chip Thinning) збільшується подача, під час оброблення складних поверхонь можливі дефекти. Такі, як припали та врізання інструменту в оброблювану деталь.

### 1.4.3 Аналіз OptiPath від CGTech

Компанією CGTech (США) розроблений програмний продукт під назвою Vericut. Основною проблемою, що вирішує ця розробка, є перевірка програм управління G-кодом при імітації у віртуальній машині для виявлення помилок, зіткнень інструментів тощо [27].

Програма має модуль OptiPath [28], який здатний оптимізувати режим різання, регулюючи подачу (рис 1.16) відповідно до принципу: чим вище швидкість видалення матеріалу (MRR), тим менше значення подачі і навпаки.

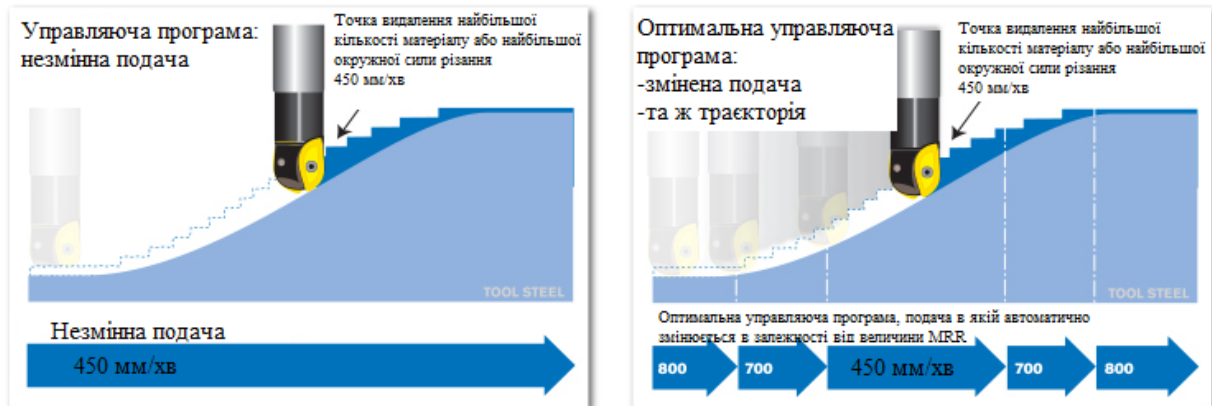


Рисунок 1.16 – Принцип оптимізації управляючої програми [28]

OptiPath зчитує з файлу управляючої програми траєкторію руху інструменту та ділить її на декілька сегментів. Там, де це необхідно, виходячи з кількості видаленого матеріалу в сегменті, вона призначає нове значення подачі для кожного сегменту окремо. Потім створює нову управляючу програму в якій траєкторія руху інструменту, ідентична оригінальній (рис 1.17).

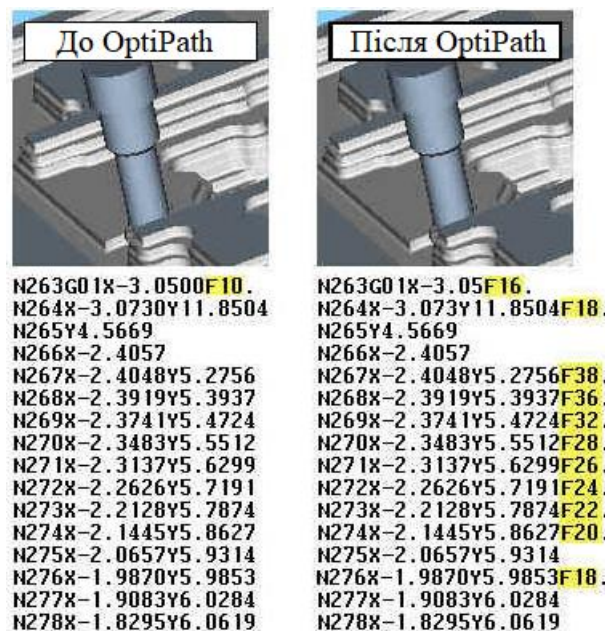


Рисунок 1.17 – До застосування OptiPath та після [28]

Однак алгоритмів такого контролю або визначення MRR не надано, і даних про ефективність такої оптимізації явно недостатньо для її практичної оцінки.

#### 1.4.4 Аналіз iMachining від SolidCAM

На даний момент найбільш популярна технологія називається iMachining, що означає інтелектуальну обробку. Ця технологія реалізована в CAM-системах SolidCAM, Siemens NX та InventorCAM.

Відзначається, що SolidCAM-це єдина CAM-система, в якій технологі-програмісту не потрібно винаходити або вибирати режим різання. Унікальні траєкторії (на відміну від трохоїдальних, використовуваних Vortex технологією) утворюють складні поліморфні спіралі (рис. 1.18), які, як кажуть, максимізують час контакту інструменту з заготівлею і скорочують час оброблення [19].

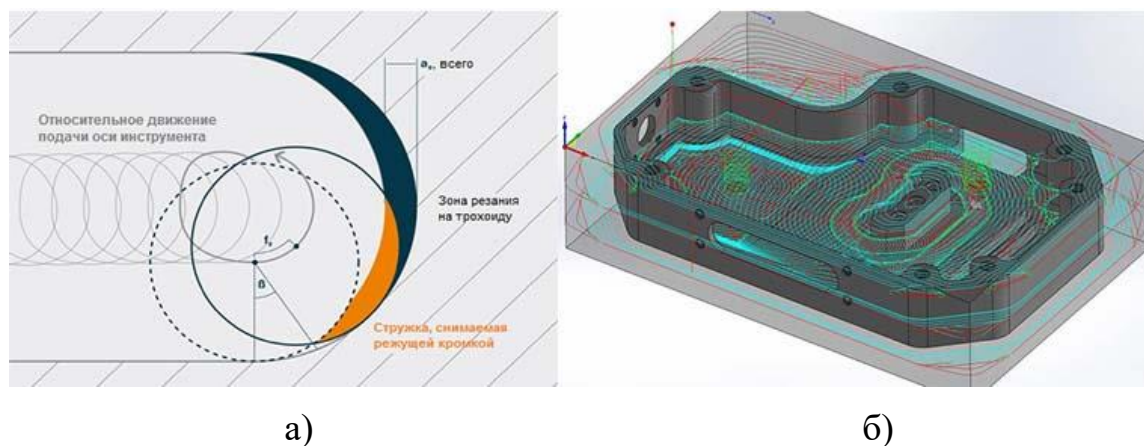


Рисунок 1.18 - Траєкторії руху інструменту [29]:

а) – трохоїдальна траєкторія; б)- поліморфні спіралі

Також, було заявлено, що кут різання автоматично перераховується і зберігається в межах між допустимим максимальним і мінімальним значенням,



подача також динамічно перераховується таким чином, щоб забезпечити постійну температуру та силу, яка діє на ріжучий інструмент при обробці (рис 1.19).

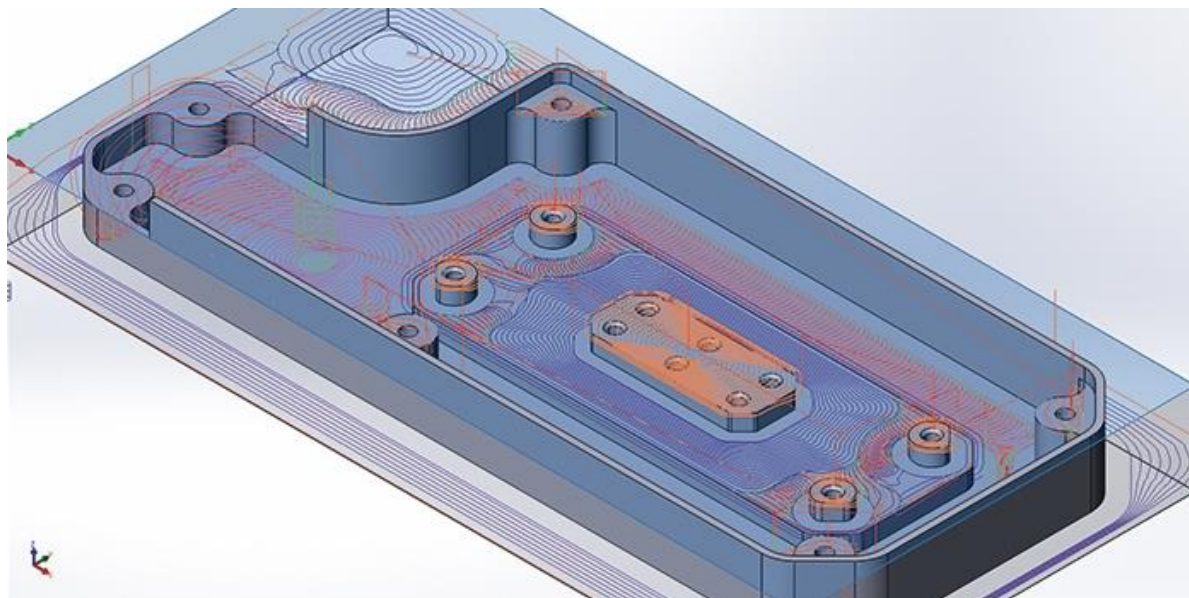


Рисунок 1.19 – Траєкторія формоутворення спроектована модулем iMachining [29]

Ці заходи дозволяють збільшити термін служби інструменту і підвищити на скільки це можливо об'ємну продуктивність різання (MRR). Завдяки постійному перерахунку моделі заготовки, залишкового матеріалу, iMachining забезпечує постійний процес різання, без зайвих переміщень інструменту по повітрю, тобто зменшення кількості холостих ходів [18].

Крім того, стверджується, що технологічний майстер-модуль iMachining автоматично оптимізує режим різання з урахуванням матеріалу заготовки, процесу різання і верстата.

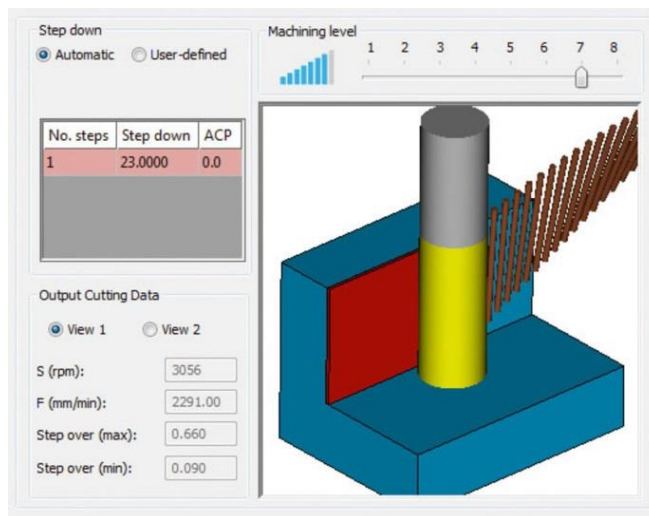


Рисунок 1.20 – Врахування жорсткості системи технологічної обробки при розробці програми управління

Як вже зазначалося, технолог iMachining застосував апріорний метод управління, при цьому інформація про жорсткість технологічної системи обробки необхідна для оптимізації процесу різання. Оскільки така інформація може бути отримана лише в результаті експериментальних досліджень, технологу надається можливість попередньо вибрати один із можливих рівнів (рис. 1.20). Таким чином, пропонується адаптувати процес моделювання до реальних умов обробки, зменшити діапазон невизначеності при розгляді жорсткості конкретної технологічної системи обробки шляхом вибору одного з 8 можливих рівнів, який адаптує розрахункову обробку до реальних умов. Саме так пропонується подолати стандартні проблеми з жорсткістю шпинделя і заготовки, а також інструменту, щоб уникнути надмірної вібрації [19]. Практичне використання технології iMachining може підвищити продуктивність, хоча ступінь ефективності буде залежати від конкретних умов виробництва [19].

Однак це рішення, хоча і дозволяє враховувати реальні умови, передбачає ітераційний пошук рівня за результатами реальної обробки на верстаті з ЧПК.



## 1.5 Висновок

З огляду сучасних провідних САМ-систем можна зробити висновок, що більшість з них, використовують метод управління за апіорною інформацією, через відносну легкість створення управління під час його використання.

САМ-системи зазвичай використовують геометричні критерії задля забезпечення стабілізації процесу різання. Геометричні критерії пов'язані не з головною характеристикою будь-якого процесу різання, швидкістю видалення припуску (Material Removal Rate), а з траєкторією формоутворення.

Тож мета роботи: Стабілізувати умови контурного фрезерування за швидкістю видалення припуску (Material Removal Rate) для окремої управляючої програми.

Для цього потрібно виконати наступні кроки:

6. Спроекувати в САМ-системі управляючу програму записану в G-кодах.
7. Сформувати масиви траєкторій руху інструменту.
8. Моделювати процес оброблення
9. Створити управляючу програму в якій значення MRR буде не змінним на протязі обробки, завдяки корекції подачі.
10. Спроекувати нову управляючу програму в G-кодах з зміненою подачею.

Для виконання цього плану потрібно розробити прикладну програму, котра б могла створювати цифрові масиви траєкторій руху інструмента з спроектованих в САМ-системах управляючих програм.

## **РОЗДІЛ 2**

### **РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ МАСИВІВ ТРАЄКТОРІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ**

#### **2.1 Передумова розробки програми**

Процес контурного фрезерування охарактеризується перманентною видозміною умов геометричної взаємодії фрези та заготовки, що в свою чергу викликає належну реакцію у виді зміни сили різання та деформації технологічної обробної системи (ТОС) [30]. Зараз, процес контурного фрезерування проходить на верстаті з ЧПК, що здійснює оброблення за допомогою управляючої програми, яка створена у САМ-системі. Таким способом, простіше вплинути на процес безпосередньо через цю програму. Стабілізуюче управління повинно бути спроектовано за результатами апіорної інформації.

Не дивлячись на успіхи сучасних компаній, що розробляють САМ-системи для програмування управляючих програм, їх аналіз [19] демонструє незначні вади, зв'язані з відсутністю у апіорній інформації, що застосовується, найголовнішої характеристики у процесі різання, а саме – швидкості видалення припуску (MRR – Material Removal Rate), якраз за якою можна оцінити процес. Насправді, таку характеристику для контурного фрезерування можливо здобути тільки під час проведення моделювання процесу видалення припуску [21].

При використанні розроблених програм моделювання у вирішенні вказаної проблеми неодмінно потрібно забезпечити створення цифрового масиву траєкторій формоутворюючих рухів, які записані в G-кодах управляючої програми.

Задача. Розробити алгоритм та прикладну програму автоматичного проектування цифрових масивів формоутворюючих рухів під час контурного фрезерування по аналізу управляючої програми в G-кодах.

## 2.2 Розроблення алгоритму, розрахунки цифрових масивів

Алгоритм вирішення поставленої задачі показано на рис. 2.1. Управляючу програму, яку було спроектовано в САМ-системі, завантажено до програми, як текстовий файл (\*.txt). В управляючих програмах для контурного фрезерування, як за правило, містяться коди прямої (G01) або/та дуги кола (G02, G03). При виявленні цих параметрів кожен рядок файлу перевіряють на наявність, або відсутність текстових змінних (*str*) і у випадку, якщо вони знайдені, проводять ідентифікацію за формою траєкторії, якщо ні, тоді перевіряється наступний рядок, шляхом додавання номеру  $k$  і т.д. Функціонування алгоритму вважається закінченим при умові  $k > N$ , де  $N$  – кількість рядків у файлі. При ідентифікації прямої, проходить визначення наступних координат: початку  $x_1[j]$ ,  $y_1[j]$  та кінця  $x_2[j]$ ,  $y_2[j]$ , коли дуга кола, то дані доповнюють радіусом  $R[j]$ . Де  $j$  – номер ідентифікованої ділянки траєкторії.

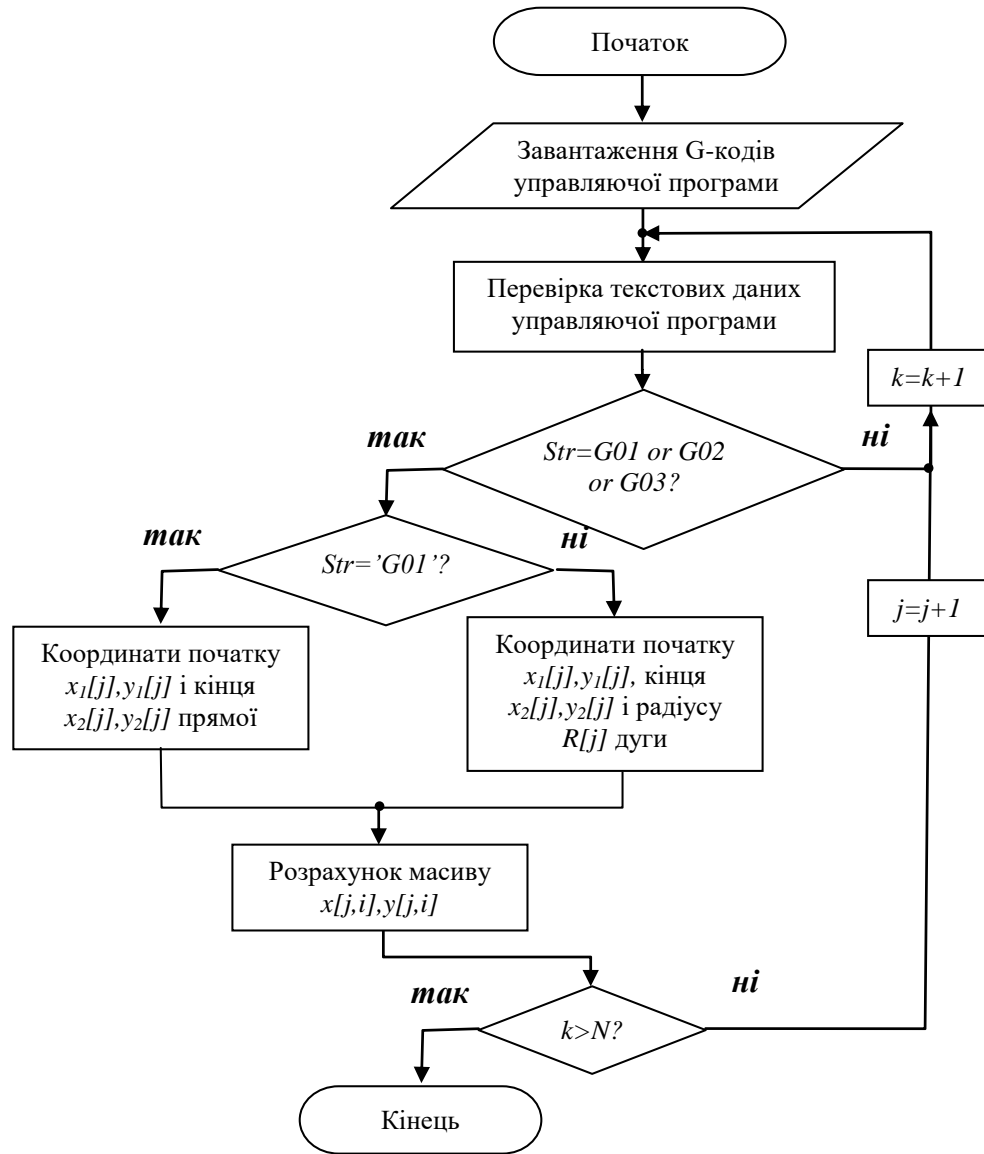


Рисунок 2.1 - Алгоритм програми

Далі проводиться розрахунок цифрового масиву траєкторії. Найперше визначають кут  $\alpha[j]$  нахилу ділянки у заданій системі координат:

$$\alpha[j] = \arctan \frac{y_2[j] - y_1[j]}{x_2[j] - x_1[j]} \quad (2.1)$$

Разом з цим, попередньо до застосування формули (1), виконують перевірку: якщо  $x_2[j] = x_1[j]$ , то тоді при  $y_2[j] - y_1[j] < 0$  приймається, як  $\alpha[j] = 3\pi/2$ , а при  $y_2[j] - y_1[j] > 0$  приймається, як  $\alpha[j] = \pi/2$ . Маємо, масив відрізка прямої визначають у параметричній формі:

$$\begin{cases} x[j,i] = x_1[j] - hi \cos \alpha[j] \\ y[j,i] = y_1[j] + hi \sin \alpha[j] \end{cases} \quad (2.2)$$

де  $h$  – крок масиву,  $i$  - порядковий номер точки масиву.

Для ділянки, описаної дугою кола, застосовують чотири можливі варіанти, які розрізняють по наступних ознаках. Під час руху за хордою ділянки від її початку до її кінця, дуга ділянки може розміщатись ліворуч або ж праворуч від хорди, та аналогічно - центр дуги може знаходитись зліва або справа від хорди.

Координати  $xo[j]$ ,  $yo[j]$  центру кола визначають за формулами:

$$\begin{cases} xo[j] = (x_1[j] - x_2[j]) / 2 \mp \sin \alpha[j] \sqrt{(R[j])^2 - [(x_1[j] - x_2[j])^2 + (y_1[j] - y_2[j])^2] / 4} \\ yo[j] = (y_2[j] - y_1[j]) / 2 \mp \cos \alpha[j] \sqrt{(R[j])^2 - [(x_1[j] - x_2[j])^2 + (y_1[j] - y_2[j])^2] / 4} \end{cases} \quad (2.3)$$

Знаки  $\pm$  приймають згідно наведених ознак про розміщення центру дуги по відношенню до хорди. Масив дискретної геометричної моделі дуги розраховують за формулами:

$$\begin{cases} x[j,i] = xo[j] \pm R[j] \cos(hi / R[j]) \\ y[j,i] = yo[j] \pm R[j] \sin(hi / R[j]) \end{cases} \quad (2.4)$$

## 2.3 Інтерфейс розробленої програми

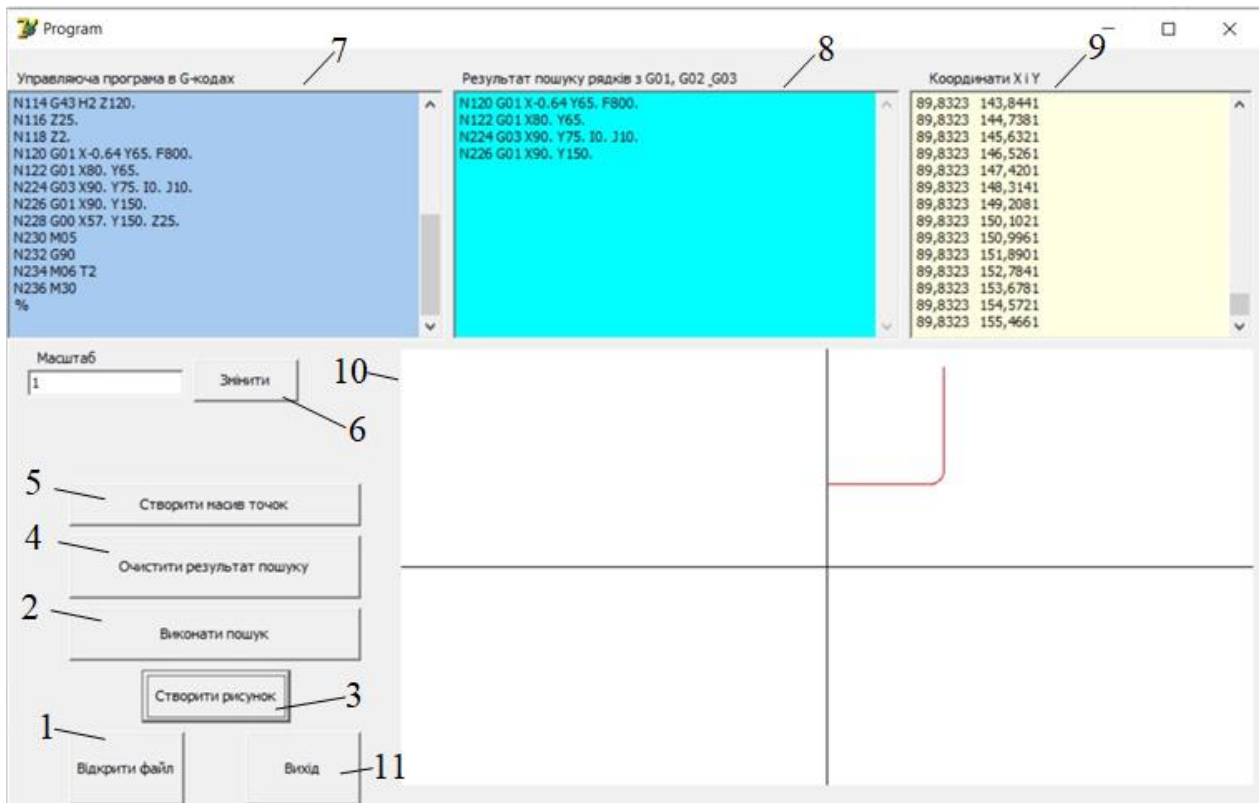


Рисунок 2.2 – Інтерфейс розробленої програми

Як показано на рис 2.2, інтерфейс програми є досить простим. Щоб почати роботу з програмою потрібно завантажити файл з управлінням. Можна зробити це за допомогою кнопки 1, далі в вікні 7 з'явиться текст управляючої програми. Після цього проводиться пошук координат в завантаженій управляючій програмі за допомогою кнопки 2. Пошук відображається у вікні 8, як рядки G-коду в яких записані формоутворюючі рухи та у вікні 9, як їх координати. Для перевірки пошуку використовується кнопка 3, яка створює рисунок за знайденими координатами на полі 10, та кнопка 6, що може змінювати масштаб рисунку. Для розрахунку за вище наведеними формулами (2.1, 2.2, 2.3 та 2.4) масиву точок, використовується кнопка 5. Натиснувши 4, очищуються вікна пошуку, що дає можливість

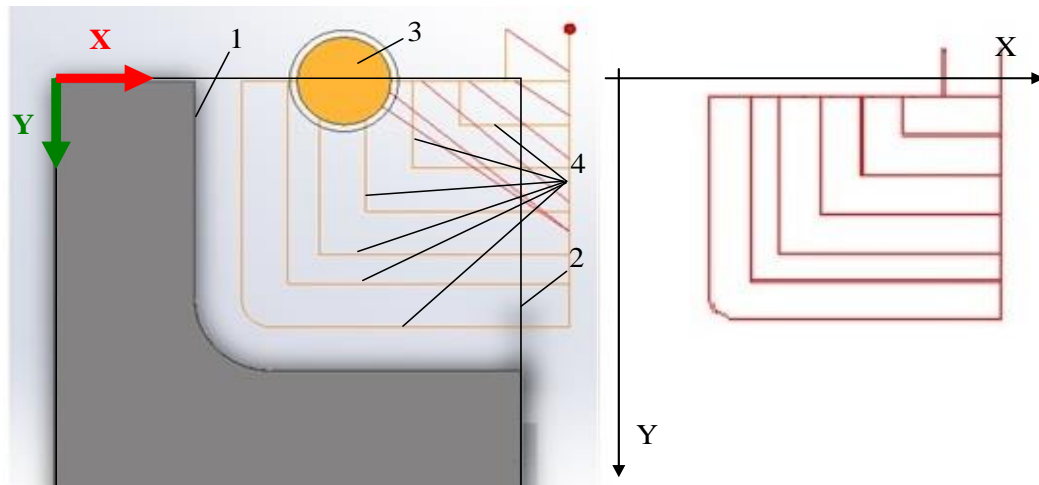
перевірити спроектовані масиви створивши рисунок на полі 10 за допомогою кнопки 3. Отже, якщо програма виконала своє завдання, вона може бути закрити кнопкою 11.

## **2.4 Проведення моделювання**

Як приклад, функціонування розробленої прикладної програми була взята до використання схема фрезерування контуру, який утворений двома прямими та спряженою дугою кола. Фрезерування виконують з прямокутної заготовки. Управляюча програма була створена за допомогою пробної версії САМ-системи SolidCAM, що має опцію iMachining.

На рис.2.3, а наведені результати по закінченню анімації спроектованої управляючої програми. Фрезерування контуру 1 деталі здійснюється з прямокутної заготовки 2 за допомогою фрези 3. Траєкторія руху фрези як робоча, так і холоста позначені лініями 4.

Спроектвану у САМ-системі SolidCAM управляючу програму у G-кодах було завантажено у розроблену програму у виді текстового файлу. В результаті створено файл в якому здійснено запис розрахованих цифрових масивів формоутворюючих траєкторій. Для верифікації такі масиви показані в графічному виді в аналогічній системі координат (рис.2.3, б).



а)

б)

Рисунок 2.3 - Результати моделювання:

а) САМ-система SolidCAM; б) траєкторії за спроектованими цифровими масивами

Порівняння результатів до траєкторій управляючої програми підтверджує адекватність її функціонування.

## 2.5 Висновки

Отже, створення цифрових масивів траєкторій формоутворюючих рухів, які записані в G-кодах управляючої програми надає можливість здійснити моделювання процесу контурного фрезерування. Де, в свою чергу, буде реалізовано можливість визначення взаємодії фрези з заготовкою на кожному кроці процесу, під час зміни координат фрези за розрахованими цифровими масивами формоутворюючих траєкторій. Зазначене моделювання відображає адекватну картину зміни найголовнішої характеристики процесу різання за формоутворюючими траєкторіями. Оскільки зазначені масиви створені за допомогою управляючої програми, яка буде в подальшому використовуватись при фрезеруванні контуру на верстаті, появляється можливість здійснити



проектування управління (подачею, чи подачею та частотою обертання фрези разом), яке по результатах моделювання у взятій окремій програмі [21] забезпечить стабілізацію процесу зі змогою у подальшому здійснити його оптимізацію.

## **РОЗДІЛ 3**

### **СТАБІЛІЗАЦІЯ УМОВ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК**

#### **3.1 Аналіз можливостей стабілізації умов різання в модулі iMachining**

##### **3.1.1 Створення управляючої програми в G-кодах для моделювання**

Були проаналізовані заявлені властивості технології iMachining за допомогою комп'ютерного експерименту, обробки зразка, контур якого складає дві прямі, котрі спряжені між собою дугою кола. Оскільки технологія (як і все вище зазначене) використовує метод управління, заснований на апіорній інформації, суть експерименту полягала у порівнянні результатів проектування з результатами, отриманими в процесі моделювання [8]. Моделювання проводиться чисельними методами і визначає основну характеристику процесу фрезерування – швидкість видалення матеріалу (MRR).

Для експерименту була використана пробна версія SolidCAM з модулем iMachining [9], використовуючи який була розроблена програма управління фрезеруванням контуру деталі 1, фрезою 2 (рис. 3.1, а) та були створені G-коди (рис. 3.1, б).

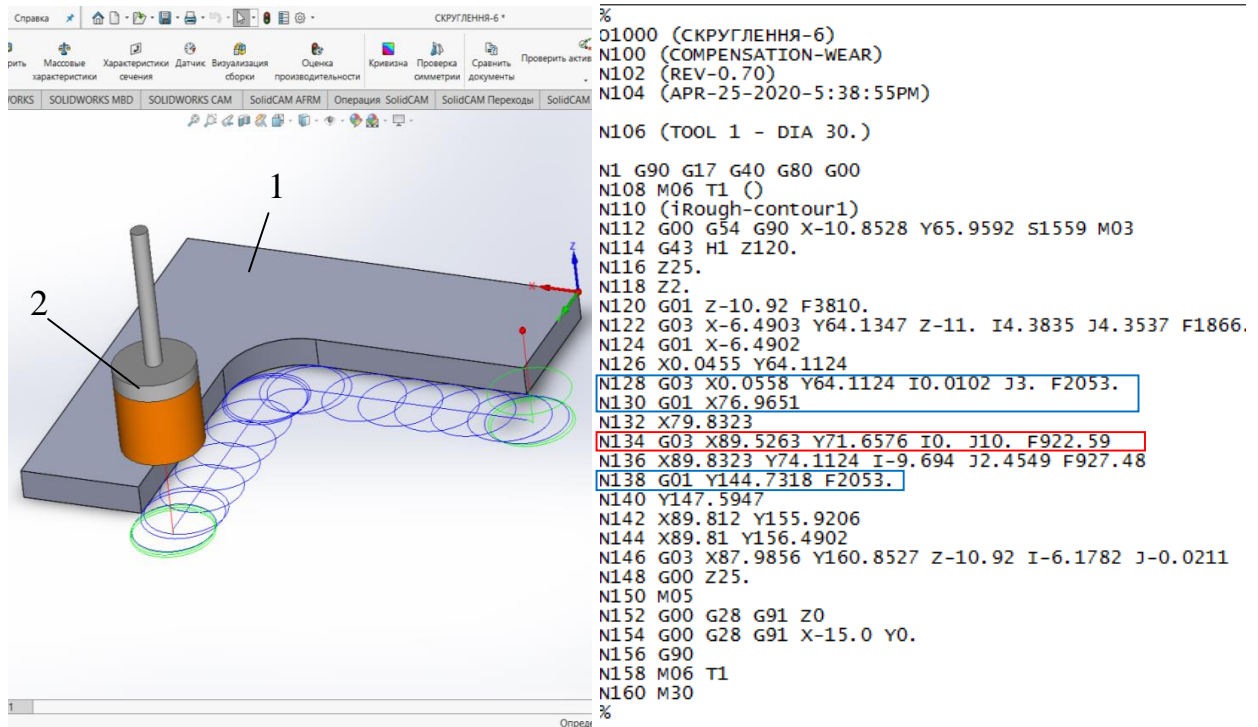


Рисунок 3.1 - Результати проектування та створення управляючої програми в iMachining SolidCAM:

а) - інтерфейс моделювання; б) - G-код, що міститься у програми управління

### 3.1.2 Вибір вихід даних моделювання

Вибрано вихідні дані: заготовка – матеріал Сталь30, радіус контуру заготовки 25мм, припуск 1,5мм, товщина 10мм, кінцева фреза Ø30мм, 6 зубців, кут нахилу леза 300, суцільна Solid carbide A20. Надалі, всі подальші проектні заходи були виконані в інтерактивному режимі.

Аналіз автоматично розробленого G-коду програми управління показує, що система вибрала режим HSM (High Speed Machining). Швидкість обертання шпинделя – 1559 об / хв, а подача на ділянках де оброблювалась площина – 2053 мм/хв (див. N 128 та N138), а при обробці циліндричної поверхні подача зменшується до 922,59 мм/хв і 927,48 мм/хв. Потрібно зазначити, що початок зміни подачі відповідає координаті за траєкторією формоутворення – це

відбувається коли центр інструменту виходить на дугу кола, а точкою кінця зміни подачі, слугує вихід інструменту з дуги кола.

### 3.1.3 Моделювання процесу контурного фрезерування

Було проведено моделювання для аналізу відповідності управління процесом різання принципу стабілізації за критерієм швидкості видалення матеріалу (MRR). Моделювання проводилося чисельно в спеціальній програмі, інтерфейс якої показаний на рис. 3.2.

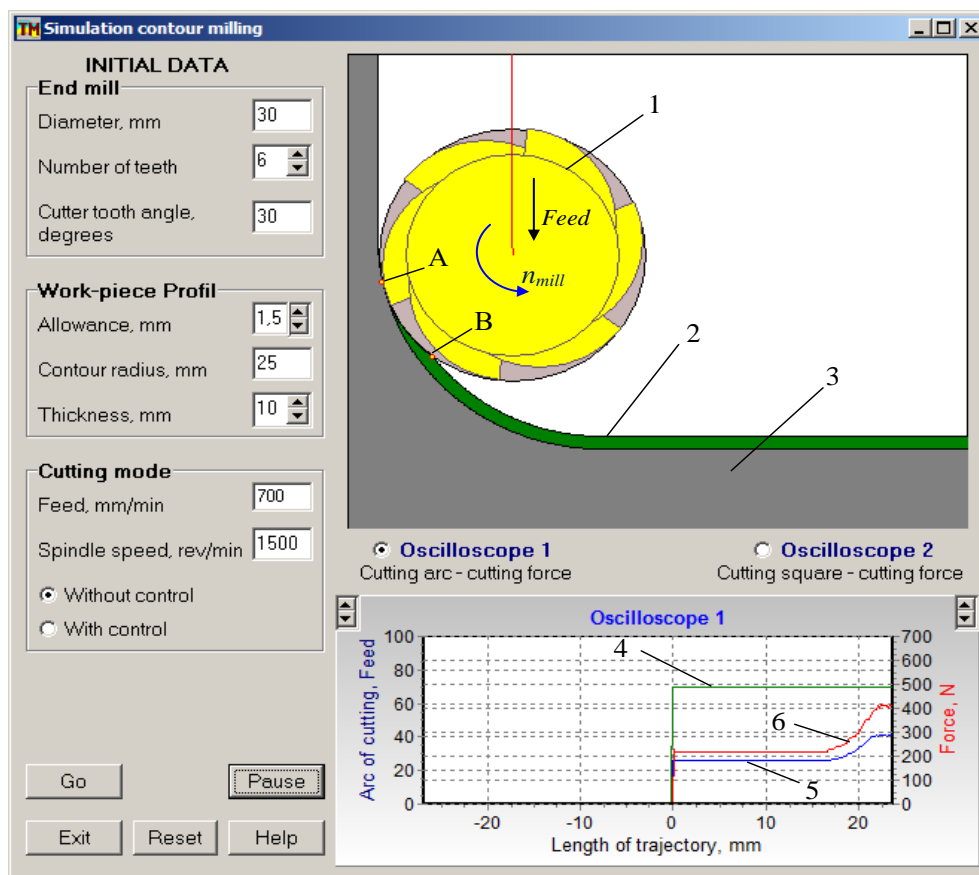


Рисунок 3.2 - Інтерфейс програми для моделювання

Вихідні дані для моделюючої програми, зазначені у лівих віконцях, вони точно відповідають вихідним даним процесу контурного фрезерування, що був

використаний для підготовки програми управління в SolidCAM. Під час моделюванні в графічному вікні відтворюється рух інструменту 1, що видаляє припуск 2 з заготовки 3. Завдяки чисельному алгоритму, який використовується програмою моделювання, визначається перетин цифрового масиву контуру заготовки і інструменту (фрези) [8], при цьому точки початку (точка А) і кінця (точка В) ріжучої дуги визначаються на кожному кроці моделювання.

На інтерфейсі віртуального осцилографа відображаються графіки подачі - лінія 4, кут різання - лінія 5 та лінія 6 - що являє собою окружну складову силу різання. Кут різання та подача вимірюються за лівою віссю (величина подачі зменшується в 10 разів), окружна складова сили різання вимірюється вздовж правої осі. Всі графіки мають зв'язок з рухом інструмента (фрези) вздовж траєкторії формоутворення - горизонтальної осі осцилографа.

За допомогою чисельного алгоритму визначається окружна складова сили різання, який функціонує відповідно до двох вкладених циклів. У внутрішньому циклі - площа  $\delta_{si}$  різання визначається на окремій ділянці ріжучого зуба фрези:

$$\delta s_i = \frac{F_{min} \sin \delta \varphi_i}{n_m z_m}, \quad (3.1)$$

де  $F_{min}$  - подача (мм/хв),  $\delta \varphi_i$  - кут різання на ділянці зуба,  $n_m$  - швидкість обертання шпинделя (об/хв),  $z_m$  - кількість ріжучих зубів.

Перехід від зовнішнього циклу до внутрішнього циклу здійснюється за умови:

$$\delta \varphi_i < \alpha_p, \quad (3.2)$$

де  $\alpha_c$  - кут різання, а елементарний кут різання на окремій ділянці зуба обчислюється за формулою:

$$\delta\varphi_i = \alpha_c - (ih \tan \beta) / R_m, \quad (3.3)$$

де  $h$  – крок руху по ширині  $B$  фрезерування,  $\beta$  – кут нахилу канавки фрези,  $R_m$  – радіус фрези,  $i$  – номер ітерації в циклі ( $0 \leq i \leq k$ ), де  $k = B/h$ .

Окружна складова сили різання обчислюється за емпіричною формулою [10]:

$$P_o = C_P \sum_{i=0}^k (\delta s_i)^\alpha, \quad (3.4)$$

де  $C_P$ ,  $\alpha$  – емпіричний коефіцієнт та показник.

Завдяки цьому алгоритму програма надає можливість визначати “миттєве” значення сили різання на кожному ріжучому зубі фрези (рис. 3.3). Для відображення такої осцилограми на екрані осцилографа інтерфейс має спеціальну опцію - «Осцилограф 2» (див. Рис. 3.2). Крім того, створена програма дозволяє проводити моделювання, як з постійною подачею, так і з подачею, яка змінюється відповідно до спеціального закону контролю. Закон управління завантажується перед початком моделювання, коли на інтерфейсі програми вибрано параметр «З управлінням».

На рис. 3.4, показані результати моделювання процесу різання при постійній подачі 700 мм/хв на інтерфейсі осцилографа: лінія 1 – подача, лінія 2 – кут різання, лінія 3 – окружна складова сили різання.

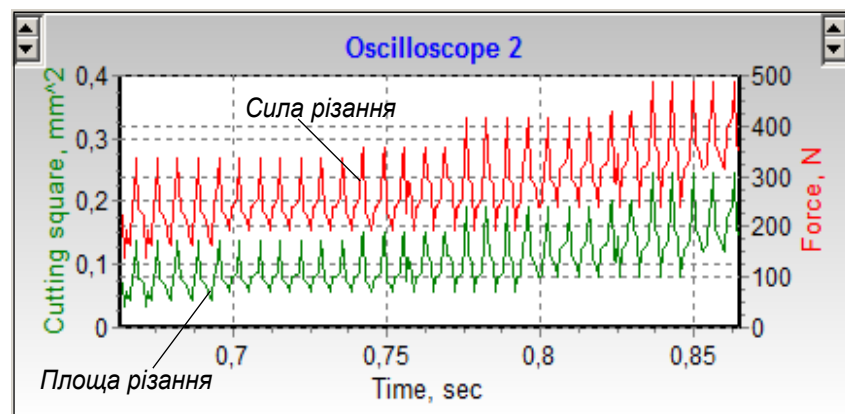


Рисунок 3.3 - Результати моделювання, осцилограми в реальному часі

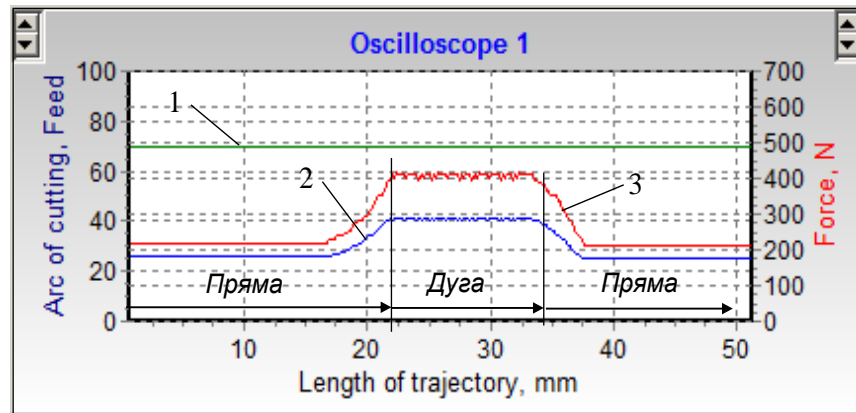


Рисунок 3.4 – Результати моделювання, постійна подача

Результати моделювання показують, що зміни в умовах різання, які провокують відповідну реакцію силових характеристик, не збігаються з геометричними характеристиками, за якими розроблена управляюча програма у модулі iMachining. Зміна умов обробки відбувається раніше, ніж центр інструменту починає рухатися за дугою (рис. 3.4). І як впливає з програми управління iMachining у G-кодах (див. Рис. 3.1, б), саме ці точки приймаються як контрольні точки при розробці подачі.

Після збереження файлу моделювання та розрахунків відповідно до формули:

$$\delta F(l) = \left( \frac{P_0}{C_P P(l)} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (3.5)$$

Отримаємо закон управління подачею в функції переміщення  $l$  по траєкторії формоутворюючих рухів, котрі стабілізують процес різання по силовим характеристикам.

Для проведення дослідів, за управляючою програмою у G-кодах (дивись рис. 3.1, б) сформований файл управління подачею, що був автоматично створений iMachining SolidCAM.

Програма управління передбачає різке зменшення швидкості подачі в N 134 (див. Рис. 3.1, б) з 2053 мм / хв до 922 мм / хв, а потім також поступове збільшення. Зрозуміло, що приводи верстата виконуватимуть такі команди відповідно до їх динамічних характеристик. Щоб визначити фактичну зміну подачі на верстаті, можна уявити модель приводу у вигляді аперіодичного елемента першого порядку:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}, \quad (3.6)$$

де  $k$  - коефіцієнт підсилення,  $T$  - постійна часу,  $s$  - оператор Лапласа.

Реакція такого приводу на ступінчатий сигнал управління представлений перехідною характеристикою зміни подачі  $F(t)$ :

$$F(t) = \Delta F \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (3.7)$$

де  $\Delta F$  - стрибок подачі.

Рух по траєкторії формування визначається інтегральною залежністю:

$$L(t) = \int F(t) dt. \quad (3.8)$$

Спільне рішення рівнянь (3.7) та (3.8) дає залежність зміни швидкості подачі від функції координати  $l$  переміщення вздовж траєкторії формоутворення. Рішення зручно виконувати чисельно; результати представлені на рис. 3.5. Поетапна зміна подачі у файлі керування G-кодом відбувається в точках А і В, а фактична зміна, враховуючи динаміку приводу при  $T = 0,03$  сек, позначається 1. Результати моделювання у створеній програмі з цим елементом управління показані на рис. 3.6, де прийняті однакові позначення графіків з попередніми.



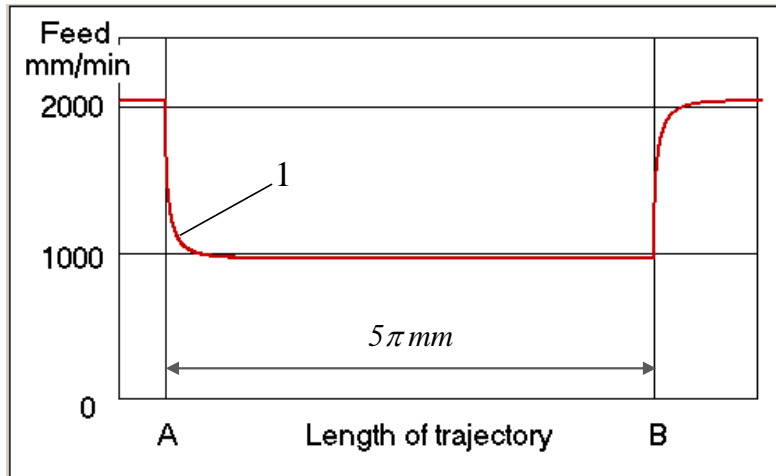


Рисунок 3.5 - Графік фактичної зміни подачі

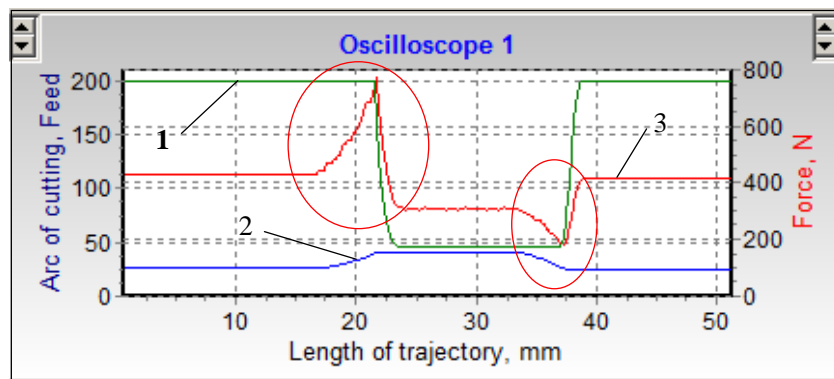


Рисунок 3.6 - Результати моделювання процесу фрезерування з контролем подачі за допомогою технології iMachining

Очевидно, що цей контроль не призводить до стабілізації процесу різання: в місцях, виділених еліпсами на рис. 3.6, спостерігаються суттєві зміни складової сили різання, що на практиці може спровокувати появу вібрації та відобразитись на формі оброблюваної поверхні. Це пов'язано з прийнятою стратегією, яка пов'язує очікувані зміни в умовах різання зі способом формування, однак, як видно з моделювання, такі зміни відбудуться набагато раніше і закінчуються пізніше, що вимагає відповідного управління за результатами моделювання.

### 3.2 Стабілізація умов контурного фрезерування

Результати моделювання показані на рис. 3.7, де використовуються ті самі позначення, що і на рис. 3.4. У формулі (3.5)  $P_0$  - прийняте значення окружного компонента сили різання під час стабілізації процесу, а  $P(l)$  - цифровий масив змін компонента сили різання під час моделювання.

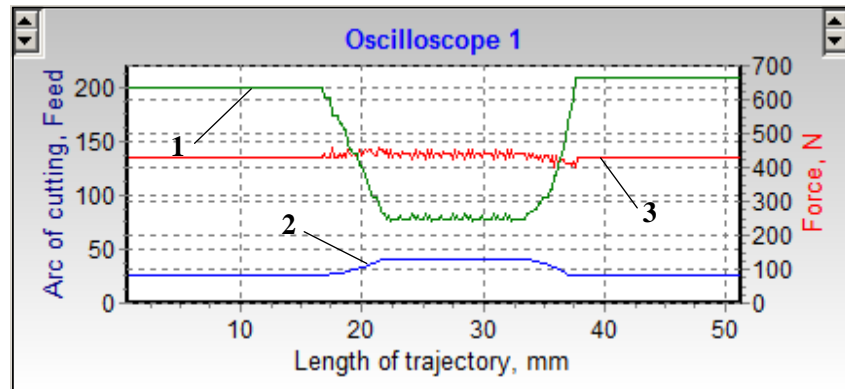


Рисунок 3.7 - Результати моделювання процесу фрезерування з контролем подачі

Як і слід було очікувати, розроблений контроль забезпечує повну стабілізацію процесу фрезерування контуру при 420 N з точки зору величини окружної складової сили різання, хоча закон зміни кута різання залишається таким же, як і в попередньому випадку.

### 3.3 Висновки

1. Аналіз показав, що технологія iMachining реалізує принцип контролю за допомогою апріорної інформації. Модуль автоматично проектує управління подачею з використанням геометричних критеріїв, що стосуються шляху формування. Під час оптимізації пропонується адаптувати розрахунок до реальних умов, вибираючи жорсткість технологічної системи механічної обробки, вибираючи один із рівнів з подальшою перевіркою результатів на практиці.

2. На прикладі проектування програми управління для обробки тестової деталі показано, що підхід, який використовується в iMachining, не стабілізує процес різання.

3. Пропонується виконати стабілізацію відповідно до основної характеристики процесу різання - швидкості видалення матеріалу (MRR). Ця характеристика отримана в результаті моделювання процесу обробки чисельним методом за розробленим алгоритмом.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ

#### 4.1 Вступ розробки до стартап проєкту

Стартап – це компанія, що була нещодавно заснована (на початковому етапі свого існування може бути навіть офіційно не зареєстрованою), вона, знаходячись в стадії розвитку, будує бізнес на основі креативних ідей та/або інноваційних технологій.

Головною перевагою стартапів є їхня інноваційність та мобільність. Таким чином, поки великі корпорації використовують уже наявні продукти, а розробка нового продукту у таких корпорацій займає довгий час, стартапи можуть скласти їм конкуренцію в деяких ринкових нішах.

Можна говорити, що великі корпорації не побоюються таких «конкурентів», а навпаки підтримують, інколи фінансують. Такий підхід використовується через те, що в основі стартапа, головним його ресурсом слугує хороша новаторська ідея. Тому в гонитві за такою ідеєю деякі великі компанії не шкодують значних сум. Ідея може бути не втілена в життя, тільки створена на папері або навіть «на словах» (план стартапу), але вона може бути затребувана. Головним критерієм успішності ідеї є попит на неї (у споживачів), адже ідея може мати велику інноваційну цінність, але в даний момент попиту на неї не буде.

В Україні існує велике різноманіття компаній, які надають свої послуги у вигляді консультацій, навчання, мотивації до успіху підприємців та молоді. Надання таких послуг полегшує реалізацію ідей, тому що нею займаються професіонали з великим багажем досвіду в своїх сферах. Реалізація ідеї стартапу в життя потребує чималих коштів. В нашій країні така реалізація буде дуже складною через певні чинники, один з яких: жорсткість умов надання

кредитування банківською системою України. Залучення інвестицій є дуже складним заходом по причині нестабільності в нашій країні, також існують ризики недоброчесної конкуренції і тиску з боку влади.

## 4.2 Опис ідеї проекту стартапа

Сучасне обладнання для металообробки зазвичай має високу вартість. Виходячи з цього, для досягнення максимальної продуктивності і якості виготовленої продукції, необхідно використовувати режими різання, які є максимально допустимими, але не підвищують вартість кінцевої продукції.

Головною ідеєю стартапа є реалізація створеного програмного продукту для стабілізації умов контурного фрезерування на верстатах з ЧПК.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартапу

| <i>Зміст</i>  | <i>Напрями використання</i>   | <i>Вигоди для споживачів</i>   |
|---|---|--|
| Моделювання процесу контурного фрезерування з подальшою стабілізацією процесу різання | Стабілізація процесу різання  | Усунення вібрацій при фрезеруванні за рахунок вибору оптимальних режимів різання |
|   | Автоматичне встановлення оптимальних режимів різання при фрезеруванні | Підвищення продуктивності контурного фрезерування                                |

Розроблена прикладна програма створює цифрові масиви траєкторій руху інструменту з управляючої програми записаної в G-кодах з подальшою стабілізацією за допомогою головної характеристики оброблення MRR.

На сьогоднішній час таке рішення є передовим і майже відсутня конкуренція на ринку.

Реалізація такого продукту розглядається з точки зору застосування на виробництві, яке має обладнання для фрезерування, та має бажання досягти його максимальної продуктивності, з можливим усуненням вібрацій і підвищення точності. Оскільки немає доступу до комерційних даних підприємств, будуть розглядатися лише приклади з відкритими даними.

#### 4.3 Визначення сильних, нейтральних і слабких сторін стартапу

Визначимо перелік сильних (S), нейтральних (N) і слабких (W) сторін та властивостей ідеї стартапу для створення його конкурентоспроможності. Була використана типова таблиця для WSN аналізу.

Таблиця 4.2 – Визначення нейтральних, сильних і слабких сторін стартапу

| № | Техніко-економічні характеристики ідеї         | (потенційні) товари/концепції конкурентів |           |           |           | W<br>(слабка сторона) | N<br>(нейтральна сторона) | S<br>(сильна сторона) |
|---|--|---|-----------|-----------|-----------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
|   |  | Мій проект                                | Конкур. 1 | Конкур. 2 | Конкур. 3 |                       |                           |                       |
| 1 | Розмір капіталовкладень для реалізації проекту |   |           |           |           |                       |                           | +                     |

|   |  |  |  |  |  |   |  |   |
|---|--|--|--|--|--|---|--|---|
| 2 | Пізнаваність<br>торгової марки                                       |  |  |  |  | + |  |   |
| 3 | Популярність<br>створеної<br>продукції в<br>споживачів               |  |  |  |  | + |  |   |
| 4 | Швидкість<br>поставок  |  |  |  |  |   |  | + |
| 5 | Гнучкість ціни   |  |  |  |  |   |  | + |
| 6 | Прибуток від<br>використання<br>програмного<br>продукту<br>покупцями |  |  |  |  |   |  | + |

#### 4.4 Технологічний аудит проєкту

Для початку, щоб зрозуміти, як ідея реалізовуватиметься технічно, виникає необхідність провести технологічний аудит проєкту за типовою технікою. Основна ідея – реалізація програмного продукту створеного для проектування цифрових масивів формоутворюючих рухів при контурному фрезеруванні за аналізом управляючої програми у G-кодах і подальшою стабілізацією процесу обробки, з огляду на це, необхідно провести пошук подібних програмних продуктів.

Було зроблено аналіз даних з табл. 4.3 та прийнято наступне технологічне рішення: Продаж створеної ліцензійної копії програмного продукту підприємствам та надання рекомендації щодо використання для користувача (додатково короткий навчальний тренінг).

Таблиця 4.3 – Технологічний аудит стартапу

| <i>№<br/>n/n</i> | <i>Ідея проєкту</i>   | <i>Технології для<br/>реалізації</i>   | <i>Наявність<br/>технології</i> | <i>Доступність<br/>технології</i> |
|------------------|---|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1                | Реалізація програмного продукту для створення цифрових масивів формоутворюючих рухів при контурному фрезеруванні за аналізом управляючої програми у G-кодах і подальшою стабілізацією процесу обробки | Продаж створеної копії програмного продукту підприємствам (згодою на ліцензійне використання) та надання інструкції для користувача (можливо короткого навчального тренінга) | Так                             | Так                               |
| 2                | Реалізація програмного продукту для створення цифрових масивів формоутворюючих рухів при контурному фрезеруванні за аналізом  | Використання програмного продукту нашим спеціально навченим спеціалістом, що буде залучатись до виготовлення   | Так, необхідне доопрацювання    | Так                               |



|  |  |                                |  |  |
|--|--|--------------------------------|--|--|
|  | управляючої програми у G-кодах і подальшою стабілізацією процесу обробки | партій деталей на підприємство |  |  |
|--|--|--------------------------------|--|--|

#### 4.5 Аналіз можливостей стартапу на ринку

Визначаємо ринкові загрози, що можуть перешкоджати реалізації стартапу та можливості, котрими можна скористатися під час впровадження його на ринок. Це дозволяє планувати напрям розвитку стартапу, ураховуючи потреби можливих клієнтів та пропозиції конкурентів.

Визначаємо групи потенційних клієнтів та їхні характеристики, формуємо перелік орієнтованих вимог до товару всіх груп (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| <i>№<br/>n/n</i> | <i>Потреби, які<br/>формується<br/>ринком</i> | <i>Цільова<br/>аудиторія</i> | <i>Відмінність у<br/>поведінці різних<br/>цільових груп<br/>потенційних<br/>клієнтів</i> | <i>Вимоги<br/>потенційних<br/>клієнтів до<br/>товару</i> |
|------------------|---|------------------------------|--|--|
| 1                | Висока якість оброблюваної поверхні           | Підприємці, виробництва      | Вимоги до якості обробленої поверхні   | Усунення вібрацій при контурному фрезеруванні            |
| 2                | Окупність фрезерного обладнання               | Підприємці, виробництва      | Висока продуктивність  | Надання оптимальних                                      |

|  |  |  |                          |                    |
|--|--|--|--------------------------|--------------------|
|  |  |  | фрезерного<br>обладнання | режимів<br>різання |
|--|--|--|--------------------------|--------------------|

Використовуючи аналітичні системи ринкового середовища, проводиться аналіз для визначення груп потенційних клієнтів. Для цього була створена таблиця факторів, які позитивно впливають на ринкове впровадження проєкту та факторів, що становлять загрозу (табл. 4.5-4.6).

Таблиця 4.5 – Фактори загроз

| <i>№<br/>n/n</i> | <i>Фактор загрози</i>                   | <i>Зміст</i>   | <i>Можливі дії (реакція)<br/>компаній</i> |
|------------------|---|--|---|
| 1                | Виробничий спад в машинобудівній галузі | Відсутність потреби у продукції                            | Створення продукції для інших галузей     |
| 2                | Економічне відкриття кордонів           | Створення нових технологій                                 | Застосування нових технологій             |
| 3                | Ріст інфляції                           | Падіння платоспроможності підприємств з якими співпрацюємо | Гнучка цінова політика                    |

Таблиця 4.6 – Фактори можливостей

| <i>№<br/>n/n</i> | <i>Фактор загрози</i>    | <i>Зміст</i>   | <i>Можливі дії (реакція)<br/>компаній</i>  |
|------------------|--------------------------|--|--|
| 1                | Протекціональна політика | Захист вітчизняного виробника внаслідок що дасть змогу | Залучення споживачів з споріднених галузей |

|   |   |   |                                  |
|---|---|---|----------------------------------|
|   |   | розвиватися галузі<br>споживачів стартапу                     |                                  |
| 2 | Надання<br>можливостей для<br>розвитку<br>інноваційного<br>підприємництва | Зменшення або повне<br>зняття податкового<br>тиску на стартап | Розширення масштабів<br>стартапу |

Таблиця 4.7 – Ступеневий аналіз конкуренції ринку

| <i>Характеристика<br/>конкурентного<br/>середовища</i> | <i>В чому<br/>проявляється<br/>характеристика</i> | <i>Вплив на діяльність<br/>підприємства, тобто можливі дії<br/>компанії для<br/>конкурентоспроможності</i>  |
|--|---|---|
| Тип конкуренції  | Монополістична<br>конкуренція                     | Ринкова ситуація, конкуренція,<br>відносно велика кількість<br>невеликих та відносно великих<br>фірм-розробників, що пропонують<br>схожі але не ідентичні програмні<br>продукти |
| Рівень<br>конкурентної<br>боротьби                     | Національний<br>рівень                            | На національному рівні<br>проявляється конкуренція з<br>розробниками та<br>дистриб'юторами програмних<br>продуктів  |
| За ознакою<br>галузі                                   | Внутрішньогалузева                                | Можливе застосування лише на<br>машино-, авіа-,<br>приладобудівельних<br>підприємствах  |

|   |                            |  |
|---|----------------------------|--|
| Конкуренція за товарними видами           | Товарно-видова конкуренція | Відстеження тенденцій ринку з можливістю появи на ньому продуктів-замінників   |
| За конкурентними перевагами               | Цінова                     | Ураховуючи динаміку попиту формуємо гнучкість ціноутворення.<br>Покращення технології, що направлена на підвищення базових характеристик |
| За інтенсивністю - марочна або не марочна | Не марочна                 | Для створення сприйняття стартап проекту, як окремої бізнес-одиниці, повинна бути забезпеченість масштабності стартапу                   |

Щоб більш детально дослідити конкуренцію, проводимо аналіз за моделлю п'яти сил М. Портера (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

|                         | <i>Прямі конкуренти в галузі</i>            | <i>Потенційні конкуренти</i>                         | <i>Постачальники</i>                | <i>Клієнти</i>                  | <i>Товари-замінники</i>            |
|-------------------------|---|--|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <i>Складові аналізу</i> | Конкурент 1;<br>Конкурент 2;<br>Конкурент 3 | До деяких марок споживачів мають певну прихильність; | Необхідності в постачальниках немає | Клієнти можуть впливати на ціну | Ціна в конкурентів є більш високою |

|           |  |  |  |   |   |
|-----------|--|--|--|---|---|
|           |  | Доступ до каналів збуту  |  |   |   |
| Висновки: | Інтенсивність конкуренції буде середньою | Можливості входу на ринок є; Потенційні конкуренти на ринку присутні | Необхідність в постачальниках відсутня | Клієнти мають змогу вимагати використувати більш розвинуті технології | Певні обмеження на ринку продажів, через більш відомі фірми конкурентів |

Отже, за результатами детального аналізу, є можливості виходу на ринок.

На основі аналізу конкуренції в галузі за М. Портером, приведеного в табл. 4.8, а також ураховуючи характеристики ідеї стартап проєкту (табл. 4.2), вимоги користувачів до товару (табл. 4.4) та фактори маркетингового середовища (табл. 4.5-4.6), визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз проводиться в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| <i>№<br/>n/n</i> | <i>Фактори</i>     | <i>Обґрунтування тих чинників, які роблять фактори для порівняння конкурентних продуктів значущими</i> |
|------------------|--------------------|--|
| 1                | Темпи росту галузі | Можливість для збільшення продажу продукту   |

|    |   |   |
|----|---|---|
| 2  | Збільшення кількості користувачів         | Прибутковість підвищується                  |
| 3  | Розширення ринку продажів                 | Залучення нових користувачів                |
| 4  | Ступінь оновленості продукції             | Відповідність наявним потребам користувачів |
| 5  | Ступінь оновлення технології              | Поява нових можливостей для покращення      |
| 6  | Рівень насичення ринка продуктом          | Гнучке ціноутворення                        |
| 7  | Сприйняття товару можливими користувачами | Стабільність продажу                        |
| 8  | Державне регулювання                      | Інвестиція у розвиток                       |
| 9  | Збільшення конкурентів                    | Обмін досвідом і знаходження партнерів      |
| 10 | Ступінь застарілості продукту             | Знаходження слабких сторін продукту         |

За попередньо визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.9) проводиться аналіз слабких і сильних сторін проекту (табл. 4.10).

Складання SWOT-аналізу (матриці аналізу слабких (Weak), сильних (Strength), можливостей (Opportunities) та загроз (Troubles) (табл. 4.11), взявши за основу виділені ринкові загрози та можливості, сильні і слабкі сторони (табл. 4.10) є завершальним етапом аналізу ринкового впровадження стартапу.

Таблиця 4.10 – Порівняльний аналіз слабких і сильних сторін проекту

| <i>№<br/>n/n</i> |  | <i>Бали</i> | <i>Порівняння товарів-конкурентів<br/>та «Конкурент 1» у рейтинзі</i> |
|------------------|--|-------------|---|
|------------------|--|-------------|---|

|    | <i>Фактор<br/>конкурентоспроможнос<br/>ті</i> |    | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
|----|---|----|----|----|----|---|----|----|----|
| 1  | Темпи росту галузі                            | -1 |    |    | +  |   |    |    |    |
| 2  | Збільшення числа користувачів                 | 0  |    |    |    |   | +  |    |    |
| 3  | Розширення ринку продажів                     | -1 |    |    | +  |   |    |    |    |
| 4  | Ступінь оновленості продукції                 | 1  |    |    |    |   |    | +  |    |
| 5  | Ступінь оновлення технології                  | 3  |    |    |    |   |    | +  |    |
| 6  | Рівень насичення ринка продуктом              | 4  |    |    |    |   | +  |    |    |
| 7  | Сприйняття товару можливими користувачами     | 7  |    |    |    |   |    |    | +  |
| 8  | Державне регулювання                          | 8  |    |    |    |   | +  |    |    |
| 9  | Збільшення конкурентів                        | 8  |    |    |    | + |    |    |    |
| 10 | Ступінь застарілості продукту                 | 7  |    |    | +  |   |    |    |    |

Таблиця 4.11 – SWOT-аналіз стартапу

|  |  |
|--|--|
| <p><i>Сильні сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• стартап є інвестиційно привабливим для інвесторів;</li> <li>• гнучка цінова політика;</li> <li>• відсутність конкурентів у ціновій категорії;</li> <li>• популярність продукції;</li> <li>• врахування потреб споживачів</li> </ul> | <p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• до цього невідома торгова марка;</li> <li>• компанія ще не встигла отримати довіру споживачів;</li> <li>• відсутність спеціалістів у сферах маркетингу та менеджменту;</li> </ul> |
| <p><i>М<br/>о</i></p>  | <p><i>Загрози:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• поява конкурентів;</li> </ul>  |

|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• збільшення доходів користувачів продукту;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• економічний спад;</li> </ul> |
|---|---|

Аналіз факторів маркетингового середовища складається з ринкових можливостей та загроз. Результатами впливу факторів є ринкові можливості та загрози, які є не реалізованими на ринку і мають певну ймовірність втілення в дійсність. Для прикладу: зменшення доходів потенційних користувачів є фактором загрози, а зробивши прогноз про посилення значущості цінового фактору при виборі товару, тобто підвищення цінової конкуренції, являє собою ринкову загрозу.

Базуючись на аналізі SWOT, розробляються альтернативи ринкової поведінки, перелік заходів для виведення стартапу на ринок, знаходження орієнтовного часу їх ринкових реалізацій з огляду на продукцію конкурентів, що можливо буде виведена на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – Альтернативи ринкового впровадження стартапу

| <i>№<br/>п/п</i> | <i>Альтернатива (спеціальний комплекс заходів) ринкової поведінки</i> | <i>Вірогідність надання інвестицій</i> | <i>Терміни реалізації</i> |
|------------------|---|--|---------------------------|
| 1                | Стратегія нейтралізації загроз на ринку сильними сторонами стартапу   | Висока                                 | 3 роки                    |
| 2                | Стратегія підсилення сильних сторін ринковими можливостями            | Висока                                 | 2 роки                    |



|   |   |         |        |
|---|---|---------|--------|
| 3 | Стратегія компенсації слабких сторін ринковими можливостями | Середня | 3 роки |
| 4 | Стратегія виходу з ринку                                    | Низька  | Немає  |

Провівши аналіз потенційних груп споживачів було обрано три цільові групи та визначена стратегія для охоплення ринку. Оскільки стартап буде представлений на одному сегменті, то буде використана стратегія концентрованого маркетингу.

Базова стратегія спеціалізації (табл. 4.14), найкраще підходить для роботи в обраному сегменті ринку.

Таблиця 4.13 – Визначення базової стратегії розвитку

| <i>Основна стратегія розвитку</i> | <i>Стратегія для охоплення ринку</i> | <i>Головні конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>   |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| Спеціалізації                     | Концентрація можливостей маркетингу  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Дозволяє освоїти високу частину ринку в цільовому сегменті, але веде до малої частки на ринку в цілому;</li> <li>• по відношенню до неспеціалізованих конкуруючих товарів мається великий ціновий розрив;</li> <li>• зменшення відмінностей у вимогах до продукції від цільового сегменту та ринку;</li> </ul> |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• вихід фірм конкурентів на ще більш вузький сегмент цільового для стартапу ринку</li> </ul> |
|--|--|---|

Головна ідея стратегії спеціалізації – концентрація на одному цільовому сегменті, без можливості охопити весь ринок. Метою виступає задоволення потреби вибраного цільового сегменту краще, ніж фірми конкуренти. Така стратегія може спиратися, як на диференціацію, так і на лідерство по витратах, або і на те, і на те одразу, але тільки в рамках цільового сегменту. Проте є вірогідність невдалої реалізації стратегії, що може призвести до істотного підриву конкурентоспроможності стартапу.

При виборі стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.14), найбільш доцільною є стратегія наслідування лідера.

Таблиця 4.14 – Визначення стратегії конкурентної поведінки

| <i>Чи є проект першим на ринку?</i> | <i>Як компанія буде залучати нових споживачів?</i>    | <i>Основні характеристики товару конкурента будуть копіюватися? Які?</i> | <i>Вибрана стратегія конкурентної поведінки?</i> |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Ні                                  | буде відбирати існуючих у конкурентів та шукати нових | Ні   | Стратегія наслідування лідера                    |

Створення стратегія позиціонування (табл. 4.15) відбувається на основі обраних сегментів та вимог споживачів в ньому до стартап-компанії і до продукту (див. табл. 4.4), також в залежності від базової стратегії (табл. 4.13), що була обрана. Головна ідея цієї стратегії – формування ринкової позиції (комплексних асоціацій), відповідно, яким споживачі зможуть ідентифікувати торгівельну марку стартап-компанії.

Таблиця 4.15 – Розроблення стратегії позиціонування

| <i>№<br/>п/<br/>п</i> | <i>Вимоги до<br/>програмного<br/>продукту</i>        | <i>Основн<br/>а<br/>страте<br/>гія<br/>розвит<br/>ку</i> | <i>Ключові<br/>конкурентоспромо<br/>жні аспекти<br/>стартапу</i>  | <i>Обрання трьох<br/>головних асоціацій, які<br/>мають бути<br/>сформовані<br/>комплексною позицією<br/>стартапу</i>  |
|-----------------------|--|--|---|---|
| 1                     | Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс                      | Стратегія спеціалізації                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Невисока ціна порівняно з програмними продуктами конкурентів;</li> <li>• швидкодія прикладної програми;</li> <li>• підтримка і консультація від розробників</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• доступність продукції у вибраному сегменті;</li> <li>• використання комп'ютерного моделювання для моделювання процесів обробки фрезеруванням</li> <li>• підвищення продуктивності</li> </ul> |
| 2                     | Зрозуміла під час використання                       |  |   |   |
| 3                     | Легкість завантаження вихідних даних для моделювання |  |   |   |
| 4                     | Результати моделювання графічно                      |  |   |   |

|   |  |  |  |                          |
|---|--|--|--|--------------------------|
|   | представляються<br>в програмному<br>продукті |  |  | фрезерного<br>обладнання |
| 5 | Правильність<br>отриманих<br>результатів     |  |  |                          |

#### 4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Перший етап – сформуванати маркетингову концепцію товару, яку отримає споживач. Для цього треба підсумувати результати аналізу конкурентоспроможності товару (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення стратегії позиціонування

| <i>Обов'язкова умова</i>   | <i>Переваги товару</i>  | <i>Основні переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>   |
|--|---|---|
| Технології, що забезпечать стабілізацію процесу контурного фрезерування кінцевою фрезою на верстатах ЧПК | Стабілізація за рахунок сталої сили різання, покращення режимів різання | Оцінка процесу обробки за головним критерієм обробки MRR, що дає змогу покращити процес оброблення.<br>Недорога вартість порівняно з продуктами конкурентів |
|  | Підвищення продуктивності контурного фрезерування обладнання            |   |

Завершальна складова маркетингової програми – створення концепції маркетингової комунікації, яка спирається на обрану основу для позиціонування, визначену специфіку моделей поведінки клієнтів (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

| <i>№</i> | <i>Можлива поведінка цільових клієнтів</i>  | <i>Канали комунікацій, якими користуються можливі користувачі</i> | <i>Головні позиції, обрані для позиціонування</i> | <i>Призначення рекламного повідомлення</i> |
|----------|---|---|---|--|
| 1        | Обережний вибір програмної продукції, що обумовлено особливістю ринку використання інформаційних технологій | Поштові розсилки повідомлень рекламного характеру                 | Технологія  | Привернути увагу до програмного продукту   |
| 2        |   | Контекстна реклама  | Технологія  |  |
| 3        |   | Спеціалізовані виставки, технологічні форуми                      | Технологія  |  |

#### **4.7 Висновки**

На основі викладеного матеріалу можна зробити висновок, що презентована ідея є актуальною та адекватною у застосуванні. Також щодо технології, в плані цінової категорії і в застосуванні на власних підприємствах та заводах є доступною.

Бар'єри входу на ринок є високими, оскільки тип ринкової структури – ринок монополістичної конкуренції. А також присутня конкуренція високої концентрації середнього рівня інтенсивності. Стратегія концентрованого маркетингу окремого сегменту було обрано для ринкової реалізації проекту. Під окремим сегментом маються на увазі галузі машино-, авіа- і приладобудування, з якими планує взаємодіяти стартап.

Розвиток презентованого стартап-проекту буде поєднаний з можливістю активізації економічного розвитку в Україні. Адже життєздатність стартапу буде визначатися темпами зростання машинобудівної промисловості і суміжних галузей, де є необхідною максимальна продуктивність виробничого обладнання.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської дисертація на тему «Стабілізація умов контурного фрезерування на верстаті з ЧПК» було:

1. Розроблений покроковий план для стабілізації контурного фрезерування на верстатах ЧПК.
2. Розроблено прикладну програму для створення цифрових масивів точок траєкторій руху інструменту під час контурного фрезерування. Адекватність її роботи була доведена.
3. Було доведено, що сучасні САМ-системи (iMachining) не враховують під час стабілізації процесу різання головний критерій – швидкість видалення матеріалу MRR.
4. Доведена можливість створення управляючої програми, контурне фрезерування за якою буде стабілізованим з урахуванням MRR.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. "Material removal rate" (PDF). Archived from the original (PDF) on 2017-05-17. Retrieved 2017-04-24.  
[https://web.archive.org/web/20170517124239/http://user.engineering.uiowa.edu/~mie032/lectures/11-turning\\_equations\\_full.pdf](https://web.archive.org/web/20170517124239/http://user.engineering.uiowa.edu/~mie032/lectures/11-turning_equations_full.pdf)
2. Петраков Ю.В. Состояние и перспективы развития САМ-систем в машиностроении. Вісник НТУУ «КПІ» Машинобудування. 2013. № 68. С.44-54.
3. Суханов Ю. Проект «короли» и «капуста» на рынке САМ. CAD/CAM/CAE Observer. 2011. №1 (61).с.22-27.
4. Petrakov Y.V., Drachev O.I. Teoria avtomaticheskogo upravlenia technologicheskimi sistemami. Moskow: Mashinistroyeniye, 2008. 336p.
5. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. УкрНДІАТ, Київ, 2004. 336 с.
6. Системы адаптивного регулирования и мониторинга для металлообрабатывающих станков с CNC /  
<http://www.omative.com/173890/ACM>.
7. Системы Адаптивного Регулирования OMATIVE ACM для металлообрабатывающих станков с ЧПУ:  
[https://www.intechnology.ru/img/file/11-03-2015/08-09-2015/omative\\_acm\\_i\\_ais\\_dispatcher\\_tehnicheskaya\\_speciaifkaciya.pdf](https://www.intechnology.ru/img/file/11-03-2015/08-09-2015/omative_acm_i_ais_dispatcher_tehnicheskaya_speciaifkaciya.pdf)
8. Jerard. R., Fussell B., Ercan M. (2011) On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining // Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida.
9. Петраков Ю. В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ. «СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ – 2020» : МАТЕРІАЛИ VI-ої



Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 8–12 верес. 2020 р.  
Херсон, 2020. С. 22—26. URL:  
<http://kntu.net.ua/ukr/content/download/79032/458477/file/Збірник%20матеріалів%20СТПК-2020.pdf>

10. Петраков Ю.В. Напрями розвитку САМ-систем / Ю.В. Петраков, В.В. Писаренко, О.С. Мацківський // Журнал інженерних наук. 2015. Т. 2, № 2. С. А7-А13. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSU\\_tekh\\_2015\\_2\\_2\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSU_tekh_2015_2_2_4).

11. Петраков Ю.В. Автоматическоеуправление процессами резания/ Ю.В. Петраков, О.И. Драчев. ТНТ. 2014. 224с.

12. Dynamic Motion Technology, MasterCAM:  
<https://www.mastercam.com/dynamic/>

13. Бортс А., Суханов Ю., Dynamic Motion Technology – технология Динамической обработки, МАШИНОСТРОЕНИЕ И СМЕЖНЫЕ:  
<http://www.cadcamcae.lv/N102/58-61.pdf>

14. <https://www.youtube.com/watch?v=WfIVX6yEocE&t=136s>

15. Функциональность Autodesk PowerMILL // ПОИНТ//  
<https://www.pointcad.ru/product/autodesk-powermill/funkczional-autodesk-powermill>

16. Евченко К., Пинчук А., PowerMILL 2013: стратегия Vortex и новые возможности для программирования пятиосевой обработки, sapr.ru:  
<https://sapr.ru/article/23449>

17. Machine DNA Profiler — новая технология оптимизации управляющих программ для станков с ЧПУ от компании Delcam. САПР и графика. № 6, 2012. С. 80-81.

18. SolidCAM The Leaders in Integrated CAM [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. — Електронні дані. — Режим доступу: <https://www.solidcam.com/ru/imachining/> (дата звернення 30.04.2021) – Назва з екрана.

19. Petrakov Y. V., Myhovych A. V. IMachining technology analysis for contour milling. Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”. 2020. vol. 89, №2. P.114-120. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202065>. [http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/202065/pdf\\_166](http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/202065/pdf_166)
20. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Оптимізація периферійного фрезерування кінцевими фрезами. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1 (76). 2016. С.88-94 [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19585/1/VM\\_12\\_Petrakov.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19585/1/VM_12_Petrakov.pdf)
21. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1 (73). 2015.С.78-83 <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16944>
22. Петраков Ю. В. Корекція траєкторій формоутворення за апостеріорною інформацією / Ю. В. Петраков, Д. К. Щуплецов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2015. - № 1. - С. 37-40. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2015\\_1\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2015_1_8).
23. . Петраков Ю.В., Кореньков В.М., Мацківський О.С. Ідентифікація процесу різання на верстаті з ЧПК / Зб. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. №32, Краматорськ. 2013. с.312-316.
24. Петраков Ю. В. 3-D моделирование для САМ-систем. Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. / Севастоп. нац. техн. ун-т. -Севастополь : Вид-во Севастоп. нац. техн. ун-ту, 2011. Вип. 118: Машиноприладобудування та транспорт. С. 119-125.
25. Петраков Ю. В., Писаренко В. В. Підготовка програми шліфувального верстату з ЧПУ для виготовлення штучного суглоба людини // зб. ДонНТУ Прогресивні технології і системи машинобудування : Міжнародний збірник наукових праць. 2010. Вип. 40. С. 200-205.
26. <https://sapr.ru/article/23449>

27. Vericut            Optipath            Module            //            CGTech:  
<https://www.johnhart.com.au/126-software/vericut>
28. OptiPath - VERICUT USA (cgttech.com)
29. ProCNC // <https://procnc.ru/solidcam-imachining-2d/>
30. Петраков Ю. В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: Монографія. К.: Січкарь, 2011. 220 с.
31. Петраков Ю. В. Перспективи розвитку інформаційних технологій в машинобудуванні України / Ю. В. Петраков // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. – 2011. – № 63. – С. 258–263. – Бібліогр.: 7 назв.

## ДОДАТОК